

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ
КАФЕДРА КОНСТРУЮВАННЯ ВЕРСТАТІВ ТА МАШИН

«На правах рукопису»

УДК _____

До захисту допущено

Завідувач кафедри

_____ В.Б.Струтинський
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 2018 р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування

на тему Розробка моделі орієнтації схвата мобільного робота

Виконав (-ла): студент (-ка) _____ ІІ курсу , групи МВ – 61м

Домчак Іван Володимирович

_____ (прізвище ім'я по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник _____ к.т.н., доц. Кравець О.М.

_____ (вчена ступінь та звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Консультант з розділу _____

_____ (вчена ступінь та звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент:

Доц. каф. ТМ, к.т.н., доц. Лапковський С.В

_____ (посада, наукова ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського”
Механіко-машинобудівний інститут
Кафедра конструювання верстатів та машин

Рівень вищої освіти другий (магістерський) за освітньо-науковою
програмою

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування
Спеціалізація «Металорізальні верстати та системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис) В.Б.Струтинський
(ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 201_ р.

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТУ

Домчаку Івану Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Розробка моделі орієнтації схвата мобільного
робота

науковий керівник дисертації Кравець О.М. к.т.н., доц.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від “15” березня 2018 року № 934-с

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження _____

4. Предмет дослідження _____

5. Перелік завдань, які потрібно розробити _____

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу _____

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Консультанти розділів проекту

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|--------|---|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| | | | |

9. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| | | | |
|--|--|--|--|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Студент _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Науковий керівник дисертації _____

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація на здобуття ступеня магістра зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», виконана на тему «Розробка моделі орієнтації схвата мобільного робота». Автор Домчак Іван Володимирович.

Робота складається з 4-х розділів та 1 додатку. Графічна частина магістерської дисертації виконана у вигляді презентації на 18 кадрів, пояснювальна записка містить 68 сторінок тексту, 43 малюнків та 2 таблиці.

Об'єкт дослідження: кінематичні співвідношення механізму маніпулювання об'єктами маніпулятора мобільного робота побудованого на основі паралельної кінематики

Предмет дослідження особливості кінематичних співвідношень механізму маніпулювання об'єктами маніпулятора мобільного робота побудованого на основі паралельної кінематики.

Мета дослідження побудова ефективної математичної моделі кінематики механізму маніпулювання об'єктами маніпулятора мобільного робота побудованого на основі паралельної кінематики.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

1. Виконати патентно-інформаційний пошук існуючих методів та алгоритмів побудови математичних моделей геометричних та кінематичних співвідношень механізмів паралельної кінематики.
2. Побудувати геометричну та кінематичну модель руху механізму паралельної кінематики.
3. Створити розрахункову процедуру в математичному пакеті Matlab на основі геометричну та кінематичну модель руху механізму паралельної кінематики.
4. Провести модельний експеримент за допомогою розробленої розрахункової процедури.

Створено та реалізовано засобами “Matlab” математичні моделі орієнтації робочої платформи мобільного робота. Запропоновано метод

визначення просторового положення об'єкту маніпулювання. Розроблено метод визначення похибки орієнтації механізму захвату робочої платформи в залежності від просторового положення об'єкту маніпулювання.

Розроблена розрахункова процедура в математичному пакеті Matlab на основі геометричної та кінематичної моделі руху механізму паралельної кінематики. Проведено модельний експеримент за допомогою розробленої розрахункової процедури.

Результати розробки обговорювались та були схвалені на Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді - машинобудуванню» Секція "Машинобудування" у 2017 та 2018 роках.

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация на соискание степени магистра по специальности 133 «Отраслевое машиностроение», выполненная на тему «Разработка модели ориентации схвата мобильного робота». Автор Домчак Иван Владимирович.

Работа состоит из 4-х разделов и 1 приложения. Графическая часть магистерской диссертации выполнена в виде презентации на 18 кадров, пояснительная записка содержит 68 страниц текста, 43 рисунков и 2 таблицы.

Объект исследования: кинематические соотношения механизма манипулирования объектами манипулятора мобильного робота построенного на основе параллельной кинематики

Предмет исследования особенности кинематических соотношений механизма манипулирования объектами манипулятора мобильного робота построенного на основе параллельной кинематики.

Цель исследования построение эффективной математической модели кинематики механизма манипулирования объектами манипулятора мобильного робота построенного на основе параллельной кинематики.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить патентно-информационный поиск существующих методов и алгоритмов построения математических моделей геометрических и кинематических соотношений механизмов параллельной кинематики.
2. Построить геометрическую и кинематическую модель движения механизма параллельной кинематики.
3. Создать расчетную процедуру в математическом пакете Matlab на основе геометрическую и кинематическую модель движения механизма параллельной кинематики.
4. Провести модельный эксперимент с помощью разработанной расчетной процедуры.

Создан и реализован средствами "Matlab" математические модели ориентации рабочей платформы мобильного робота. Предложен метод определения пространственного положения объекта манипулирования. Разработан метод определения погрешности ориентации механизма захвата рабочей платформы в зависимости от пространственного положения объекта манипулирования.

Разработана расчетная процедура в математическом пакете Matlab на основе геометрической и кинематической модели движения механизма параллельной кинематики. Проведен модельный эксперимент с помощью разработанной расчетной процедуры.

Результаты разработки обсуждались и были одобрены на Всеукраинской научно-технической конференция молодых ученых и студентов «Инновации молодежи - машиностроению» Секция «Машиностроение» в 2017 и 2018 годах.

SUMMARY

Master's thesis for Master's degree in specialty 133 "Sectoral engineering", performed on the topic "Development of the model of orientation of mobile robot grip". Author Domchak Ivan Vladimirovich.

The work consists of 4 sections and 1 application. The graphic part of the master's dissertation is executed in the form of a presentation on 18 frames, the explanatory note contains 68 pages of text, 43 drawings and 2 tables.

Object of research: the kinematic correlation of the mechanism of manipulation of objects of a robot manipulator constructed on the basis of parallel kinematics

The subject of the study is the peculiarities of the kinematic correlations of the mechanism of manipulating objects of a mobile robot manipulator constructed on the basis of parallel kinematics.

The purpose of the study is the construction of an effective mathematical model of the kinematics of the mechanism of manipulating objects of a mobile robot manipulator constructed on the basis of parallel kinematics.

To achieve this goal, the following tasks must be solved:

1. Perform patent and informational search of existing methods and algorithms for constructing mathematical models of geometric and kinematic relations of mechanisms of parallel kinematics.

2. To construct a geometric and kinematic model of motion of the mechanism of parallel kinematics.

3. Create a calculation procedure in Matlab's mathematical package based on the geometric and kinematic model of motion of the mechanism of parallel kinematics.

4. Carry out a model experiment with the help of the developed calculation procedure.

The mathematical models of the orientation of the work platform of the mobile robot were created and implemented by means of "Matlab". The method of determining the spatial position of the object of manipulation is proposed. The

method of determining the error of orientation of the mechanism of grabbing the working platform, depending on the spatial position of the object of manipulation, is developed.

A calculation procedure is developed in Matlab's mathematical package based on the geometric and kinematic model of motion of the mechanism of parallel kinematics. A model experiment was conducted with the help of the developed calculation procedure.

The results of the development were discussed and approved at the All-Ukrainian Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Students "Innovations in Youth - Mechanical Engineering", Section "Mechanical Engineering" in 2017 and 2018.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| Вступ | 11 |
| Розділ 1 | 12 |
| Задачі кінетичного та кінетостатичного аналізу механізмів паралельної кінематики | 12 |
| Висновок по розділу 1 | 37 |
| Розділ 2 | 39 |
| Геометрична та кінематична модель руху механізму паралельної кінематики | 39 |
| Висновки по розділу 2 | 53 |
| Розділ 3 | 54 |
| Математична модель механізму переміщення робочого органу | 54 |
| Розділ 4 | 62 |
| Результати моделювання | 62 |
| Висновки | 66 |
| Перелік використаних джерел | 67 |

ВСТУП

Механізми з гексагональними кінематичними структурами одержали значний розвиток за останні 20 - 25 років. Однією з причин цього є впровадження сучасних мехатронних систем в традиційні галузі машинобудування.

Механізми з гексагональними кінематичними структурами застосовуються в роботах, маніпуляторах, вимірювальних машинах, авіаційних тренажерах, промислових роботах, металообробному та іншому технологічному обладнанні.

Досвід розробки і експлуатації механізмів з гексагональними кінематичними структурами підтверджує їх високу ефективність і перспективність даного напрямку машинобудування.

Внаслідок конструктивних особливостей компоновки, механізми з гексагональними кінематичними структурами мають замкнені кінематичні ланцюги, які утворюють просторові структури. Як правило ці структури ґрунтуються на базі трикутних стрижневих систем, які утворюють рухомі шестикутники. Вони мають високі характеристики жорсткості, забезпечують високі швидкості і прискорення робочих органів. Відповідно дані можливості дозволяють суттєвим чином підвищити статичну і динамічну точність позиціонування механізмів.

Широкому впровадженню механізмів з гексагональними кінематичними структурами заважає відсутність теоретичних основ розробки механізмів, зокрема, механізмів підвищеної точності. Підвищення точності потребує комплексного дослідження кінематики та робочих процесів, що мають місце в їх основних вузлах.

РОЗДІЛ 1

ЗАДАЧІ КІНЕТИЧНОГО ТА КІНЕТОСТАТИЧНОГО АНАЛІЗУ МЕХАНІЗМІВ ПАРАЛЕЛЬНОЇ КІНЕМАТИКИ

У більшості промислових верстатів є послідовна кінематична архітектура, що означає, що кожна вісь повинна нести наступну, включаючи її приводи і шарніри.

Вимоги високошвидкісної обробки висувають на перший план певні недоліки такої архітектури: важкі рухомі частини вимагають від машинної структури, щоб висока жорсткість несучих елементів компенсували проблеми пов'язані з прогинанням, що знижують точність обробки, і обмежують динамічні дії рухів подачі.

Саме тому механізми паралельної кінематики все більше привертають увагу дослідників і організацій, так як вони, пропонують деякі переваги перед їх послідовними аналогами, такі як висока жорсткість і високі динамічні можливості.

Паралельна кінематична компоновка з'єднань забезпечує вищу жорсткість і зниження маси рухомих елементів, що зменшує ефекти інерції. Таким чином, у механізм паралельної кінематики є кращі динамічні характеристики.

Проектування верстата паралельної кінематики є складним завданням, яке вимагає подальших досліджень перш, ніж зможе очікуватися широке промислове використання. Багато критеріїв повинні бути взяті до уваги в проектуванні верстат паралельної кінематики. Ми звертаємо особливу увагу на опис кінетостатичних критеріїв, які засновуються на створення матриці Якобі для механізму.

Першим промисловим зразком механізму паралельної кінематики була платформа Гофа (рис. 1.1), розроблена в 1957, як дослідний зразок. механізм паралельної кінематики тоді використовувалися багато років в льотних тренажерах і при розробках роботів через їх низьку рухому масу і високі динамічні характеристики. З розвитком механічної обробки високої

швидкості верстат паралельної кінематики стали цікавими альтернативними проектами традиційного компоновання верстата.

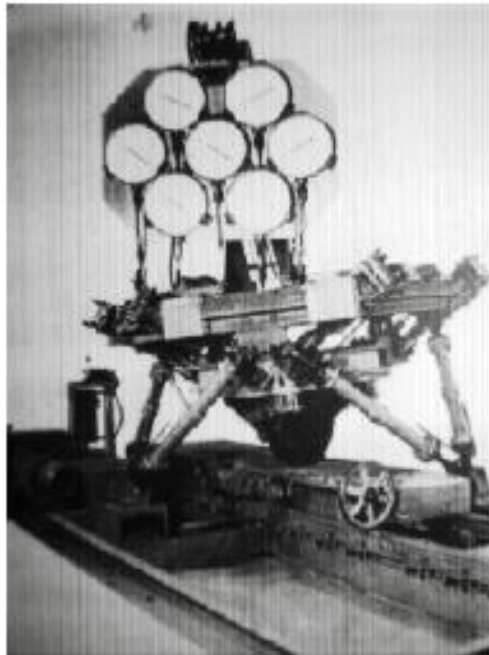


Рис. 1.1 Платформа Гофа

У механізмах паралельної кінематики робочий орган пов'язаний з основою через декілька кінематичних ланцюгів або стержнів, які встановлені паралельно. штанги взагалі уявляють собою або телескопічні стержні з нерухомими обертовими опорами (рис. 1.2),

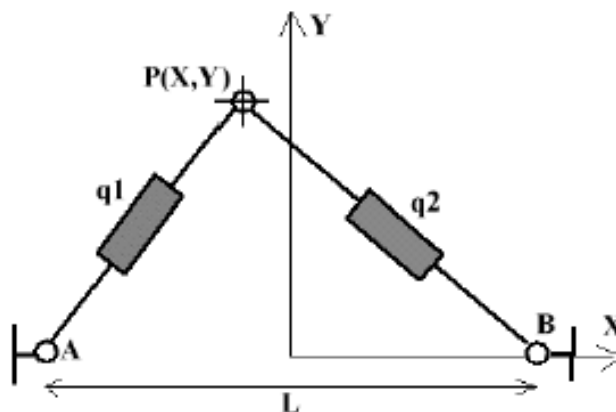


Рис. 1.2 Біпод механізм паралельної кінематики

або стержні постійної довжини з опорами ковзання (рис. 1.3).

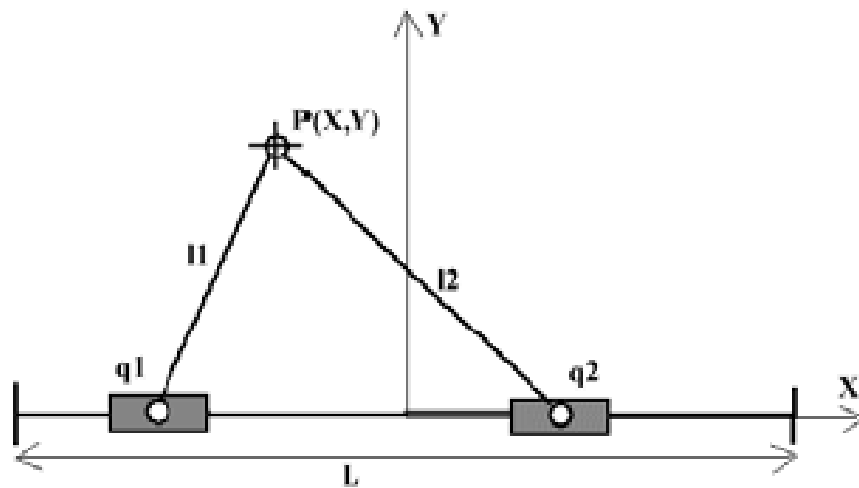


Рисунок 1.3 Біглайд - механізм паралельної кінематики

Виняткові конфігурації механізм паралельної кінематики можуть з'явитися в робочому просторі або в його межах. Є два типи особливостей. Конфігурацію, де кінцева швидкість робочого органу вимагає нескінченних об'єднаних норм, називають послідовною особливістю. Конфігурація, де робочий орган не може чинити опір ніякому зусиллю і у свою чергу, стає невіддатливою контролю, названий паралельною особливістю. Паралельні особливості особливо небажані, тому що вони викликають наступні проблеми: - високе збільшення сил в шарнірах і зв'язках, які можуть пошкодити структуру, - зменшення манірності механізму, яка може привести до нестримних рухів робочого органу, хоча шарніри, що приводяться в дію, замкнуті.

Рис. 1.4 і 1.5 показують особливості для біглайду рис. 1.4. У рис. 1.5 у нас є послідовна особливість. Градієнт швидкості напрямлений уздовж вертикальної осі дорівнює нулю, а градієнт сили нескінченний.

На рис. 1.5 показана паралельна структура.

Градієнт швидкості нескінченний уздовж вертикальної осі, а градієнт сили близький до нуля. Відзначмо, що високий градієнт не обов'язково бажаний, тому що розподільна здатність керуючого пристрою привода також зростає, що призводить до зниження точності.

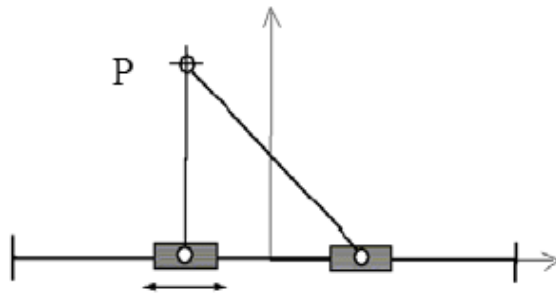


Рис. 1.4 Послідовна структура

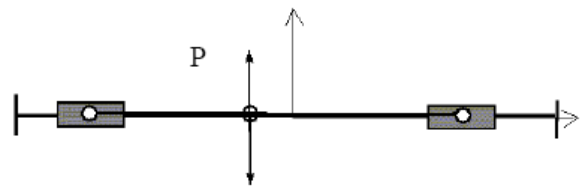


Рис. 1.5 Паралельна структура

Останні розробки верстатів отримують вигоду з технологічних удосконалень компонентів, таких як шпинделі, лінійні приводи, підшипників. Більшість верстатів заснована на послідовній архітектурі (рис. 1.5), перевага якої полягає в тому, що відносини вводу/виводу прості.

Проте, важкі маси, які нестимуть і переміщатимуть кожною віссю, обмежують динамічні можливості, такі як величина подачі або прискорення. Саме тому виробники верстатів почали цікавитися механізм паралельної кінематики з 1990 року.

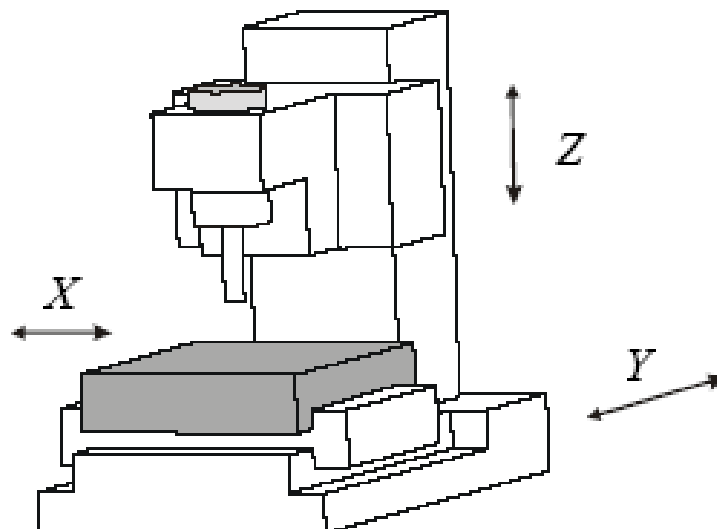
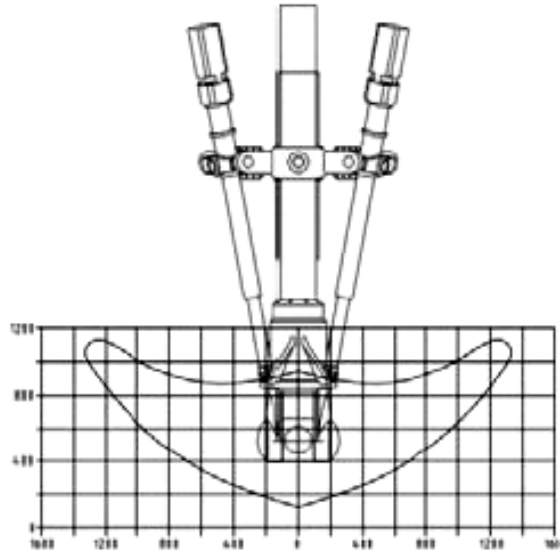


Рис. 1.6 Верстат традиційної послідовної компоновки

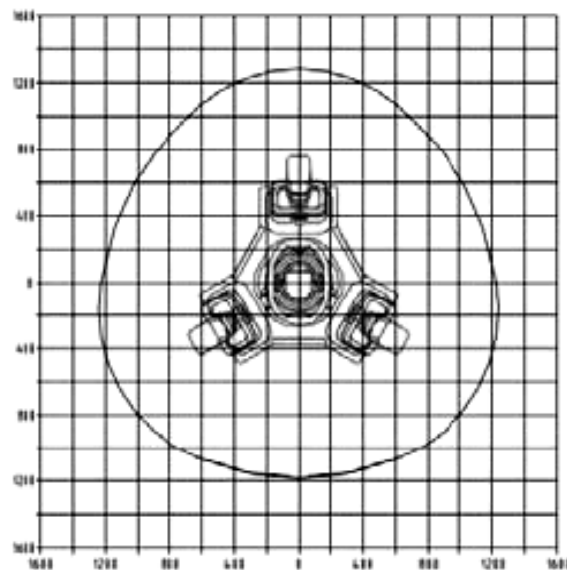
Низька рухома маса механізм паралельної кінематики і їх висока жорсткість дозволяє високошвидкісні подачі (до 100 м/хв) і прискорення (від 1 до 5g), яких потребує високошвидкісна обробка. Інша перевага полягає в тому, що стержні працюють тільки на стиск або розтяг. Проте, між

послідовними і паралельними верстатами є багато структурних відмінностей, що ускладнює можливості строгого порівняння їх виконання.

У робочого простору механізм паралельної кінематики немає простої геометричної форми, і їх робоча зона менша, в порівнянні з простором, що займає традиційний верстат, як ми можемо бачити на рис 1.7.



а)



б)

Рис. 1.7 Робоча зона Tricept 805 [1]

Для послідовного механізму величини передачі швидкості і сили є постійними. Для механізму паралельної кінематики, навпаки, ці величини можуть значно змінюватись в робочому просторі, тому що переміщення

робочого органу лінійно не пов'язані із переміщенням приводу. У деяких частинах робочого простору максимальні швидкості і сили робочого органу, можуть значно відрізнятись від максимальних швидкостей і сил приводів, особливо в околиці сингулярності. Біля сингулярного положення швидкості точність і сила досягають своїх граничних значень.

Калібрування механізм паралельної кінематики доволі складне, через складність кінематичних моделей.

Верстатами з абсолютно паралельною кінематикою - це механізм паралельної кінематики, у яких є стільки ступенів свободи скільки стержнів. На рис. 1.8 ми можемо бачити повністю паралельний механізм 3-RPR з трьома стержнями. Кожен стержень зроблений з опори обертання, лінійного приводу, і обертового з'єднання.

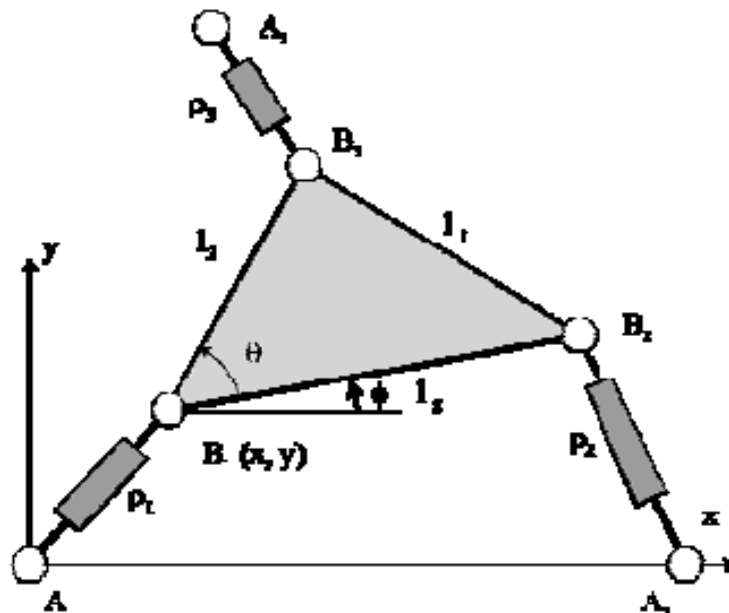


Рис. 1.8 Паралельний механізм 3-RPR

Абсолютно паралельний верстат паралельної кінематики з шістьма стержнями змінної довжини називають гексаподом. На створення гексаподів надихнула платформа Гофа.

Перший верстат паралельної кінематики був гексаподом “Віракс” від Діггінса і Люїса, представленого в 1994 в Чикаго.

Гексапод має шість ступенів свободи. Ще один недавній приклад - CMW300, робоча платформа гексаподу, розроблена Compagnie Mecanique des Vosges (рис. 1.9).



Рис. 1.9. Гексапод CMW 300 [2]

Верстат паралельної кінематики з нерухомими стержнями змінної довжини можуть мати три, чотири або шість стержнів. Urane SX [3] (рис. 1.10) від Renault Automation є триподом, робочий орган якого може рухатись тільки вздовж осей X, Y та Z. Їх конструкція подібна схемі «Дельта» робота, розробленого для переміщення об'єктів.

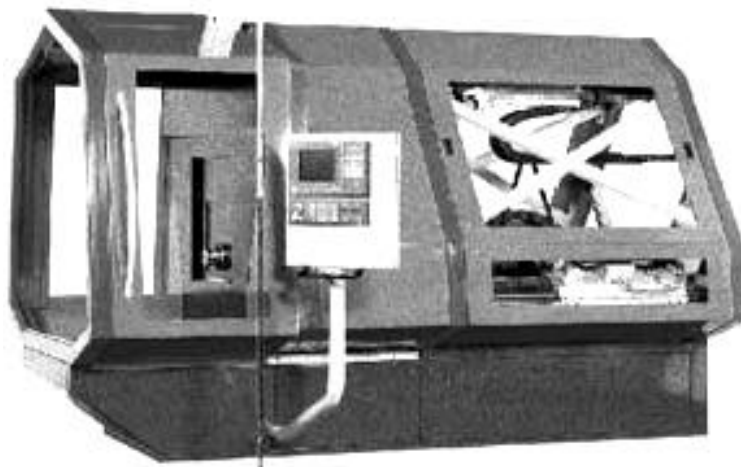


Рисунок 1.8. Urane SX

Неха М від Toyota - верстат паралельної кінематики з шістьма нерухомими стержнями змінної довжини [4] (рис. 1.11).

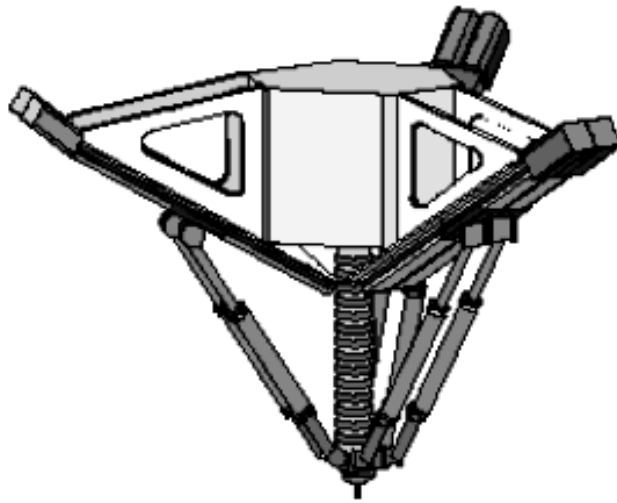


Рис. 1.11 Toyota Неха М

Tricept 805 [5] є широко використовуваним верстат паралельної кінематики з трьома стержнями змінної довжини (рис. 1.12 і 1.13). У Tricept 805 є гібридна архітектура: зап'ястя з двома ступенями свободи послідовно змонтованого на тілі трипода.

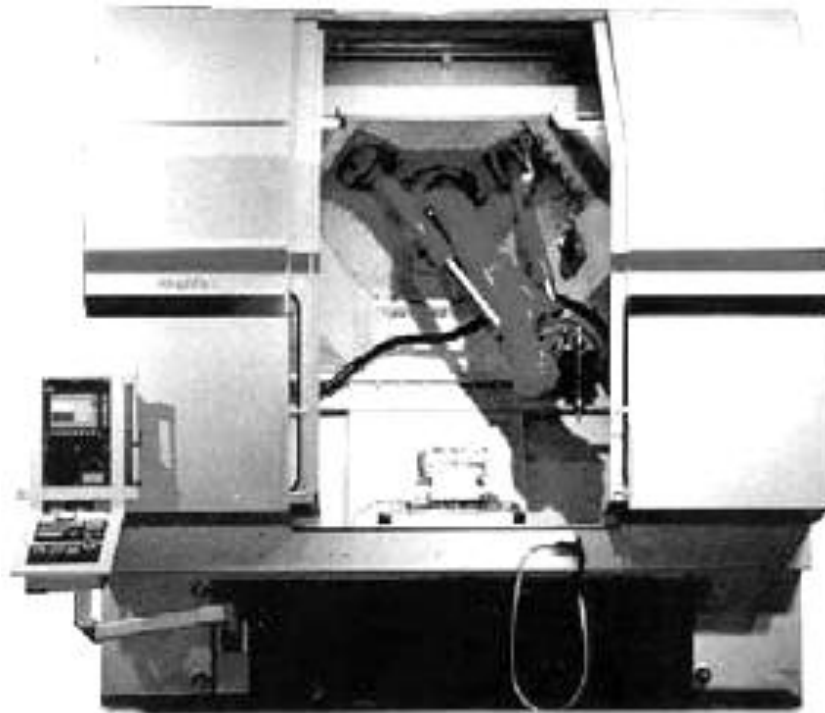


Рис. 1.12. Tricept 805

Іншим не повністю паралельним МРВ є Екліпс (рис. 1.13) від Sena Technology. Екліпс - що надприводний механізм паралельної кінематики для швидкісної механічної обробки, здатний до п'ятикоординатної обробки, та також токарної обробки, завдяки другому шпинделю.

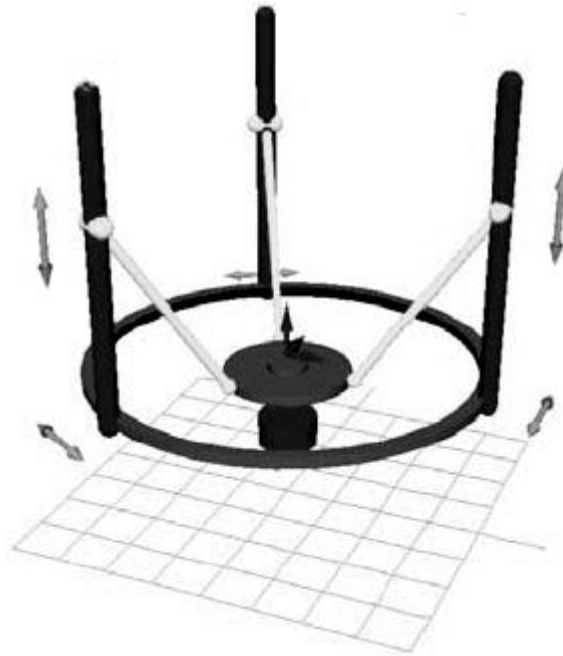


Рис. 1.13 Екліпс

З огляду на комплекс потреб, найбільш адекватні машини будуть розроблятися на основі набору конструктивних морфологічних параметрів (послідовна, паралельний або гібридна кінематична структура), конструктивна геометрія (кількість вимірів з'єднань, орієнтація і з'єднань, кількість ступенів свободи), тип приводів (лінійні або обертові), тип з'єднання (поступальне або обертове), кількість і тип ступенів свободи, завдання, для якого призначена машина. Ці параметри повинні бути визначені за допомогою відповідних критеріїв проектування.

Єдиний спосіб вирішити проблеми розробки полягає в тому, щоб об'єднати кінетостатичні критерії роботи в процесі проектування верстат паралельної кінематики. Критерії роботи Кінетостатики оцінюють здатність механізму передавати сили або швидкості з приводів на робочий орган. Ці кінетостатичні критерії роботи повинні бути в змозі гарантувати

максимальну жорсткість, точність і швидкісні дії уздовж кожного напрямку вздовж робочого простору верстат паралельної кінематики.

Щоб досягти цієї мети, ми використовуємо матрицю Якобі. Ця матриця J пов'язує ступені рухомості з'єднань з швидкостями робочого органу. А також зв'язує статичні зусилля робочого органу із зусиллями приводу.

Індекс оптимальних умов визначається як відношення між найвищим і найменшим власним значенням J .

Індекс оптимальних умов змінюється від 1 до безкінечності. У сингулярності індекс - нескінченність.

Інше особливе положення, в якому індекс дорівнює 1 названо ізотропічною конфігурацією. У цій конфігурації швидкість робочого органу і жорсткість рівні у всіх напрямках.

Ці критерії використовуються в верстатах паралельної кінематики, щоб оптимізувати форму робочого простору і однорідність дій ортоглайда, три степені свободи якого використовуються для задач фрезерної обробки (рис. 1.14).

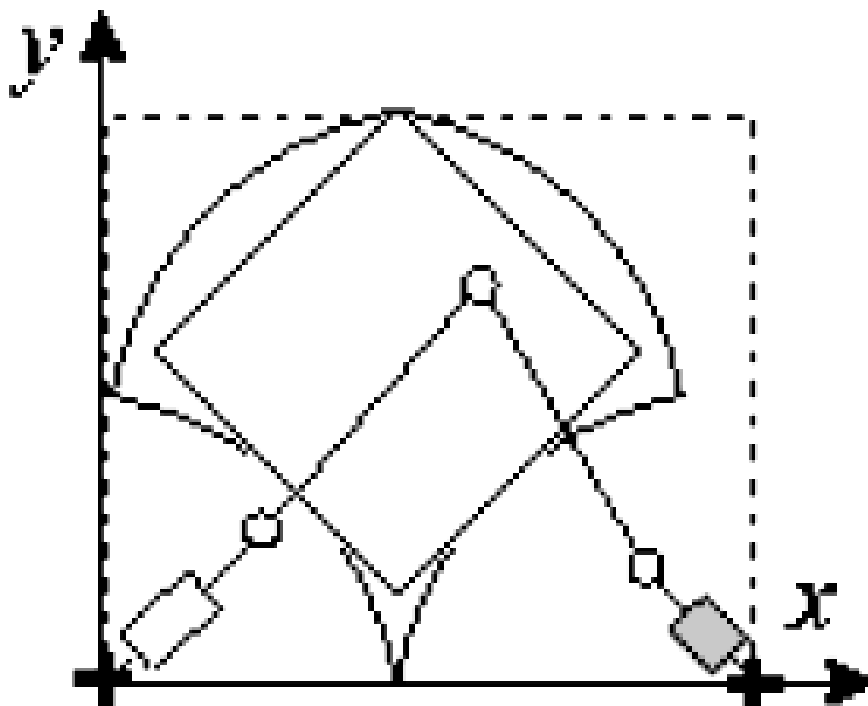


Рис. 1.14 Перетин оптимізованого робочого простору ортоглайда

Індекс оптимальних умов вимірює однорідність розподілу швидкостей і зусиль навколо однієї даної конфігурації, але він не повідомляє про величину швидкісного збільшення або чинників зусилля.

Еліпсоїд визначається по матриці $(J J^T)^{-1}$. Основні осі еліпсоїда визначені власними векторами $(J J^T)^{-1}$, і довжини основних осей – квадратний корінь власних значень $(J J^T)^{-1}$. Власні значення – пов'язані з швидкістю (або силою) градієнти уздовж основних осей еліпсоїда.

Якщо стержні верстат паралельної кінематики зроблені з шариково гвинтових пар, точність верстату паралельної кінематики може постраждати від їх деформування, що викликане нагріванням від тертя шариково гвинтових пар. Ця проблема відома проектувальниками гексаподів при використанні шариково гвинтових пар. Таким чином, крім виробничих погрешностей, при калібруванні верстат паралельної кінематики треба брати до уваги зміни розмірів через розширення. Хороший тепловий відвід може мінімізувати ефекти нагрівання.

У випадку, якщо приводи верстат паралельної кінематики лінійні, магнітний фон повинен бути підібраний так, щоб стружка не прилипала до напрямних. Технологія, використана Renault Automation для Urane SX, ізолює робочий орган від решти механізму.

Нарешті, вибір стержнів постійної або змінної довжини впливає на поведінку машини. Приводи повинні бути встановлені на стержнях у разі використання стержнів змінної довжини, що збільшує інерційність механізму. Стержні постійної довжини не мають цієї проблеми, і крім того дозволяють використання лінійних приводів, які показують високі динамічні характеристики.

Верстат паралельної кінематики з трьома ступенями свободи, ортоглайд, був розроблений з використанням двох кінетостатичних критеріїв. Його прототип приведено на рис. 1.15.

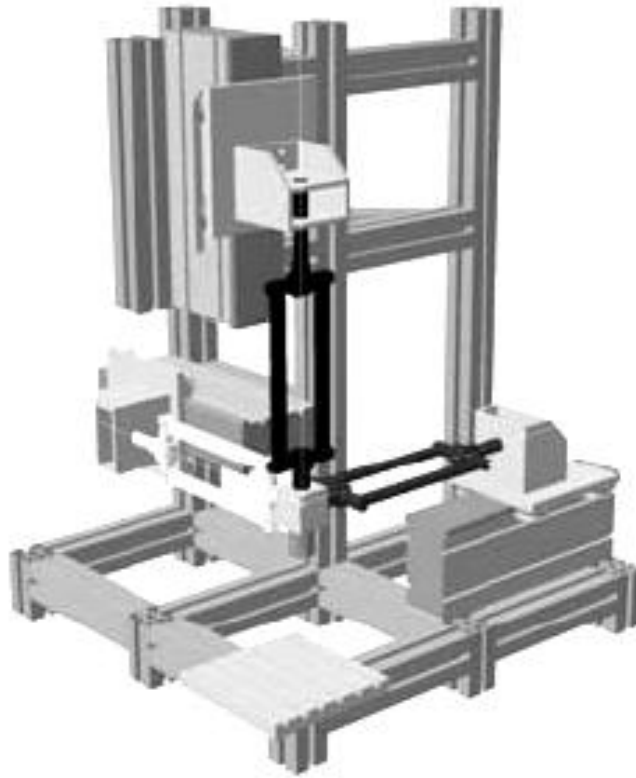


Рис. 1.15 Прототип верстат паралельної кінематики

Ортоглайд був розроблений таким чином, що у нього є ізотропна конфігурація (швидкості і коефіцієнти передачі сили рівні в кожному напрямі) його робочого простору. Крім того швидкість і коефіцієнти передачі сили залишаються в межах вищезгаданих значень усюди у робочому просторі. Кінематична схема верстата приведена на рис 1. 16.

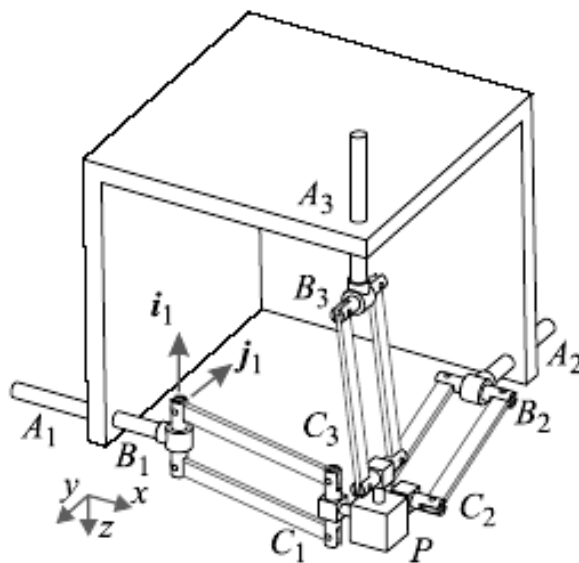


Рис 1. 16 Кінематична схема ортоглайда

Габарити ортоглайда були вибрані $200 \times 200 \times 200$ і обмежені декартовим робочим простором, так, щоб градієнти швидкості і сили залишилися між 0.6 і 17, що гарантує мінімальні робочі характеристики в доступному робочому просторі. Степені свободи з'єднань також були оптимізовані, відповідно до вибраних меж швидкості і коефіцієнтів передачі сили (рис. 1.17).

До ортоглайда можуть бути додані одна або два ступені свободи одним з наступних способів:

- встановивши послідовно зап'ястя з одним або двома степенями свободи, або
- встановивши напрямну ланку на основі ортоглайда, ведучу по відношенню до правосторонньої / лівосторонньої архітектури.

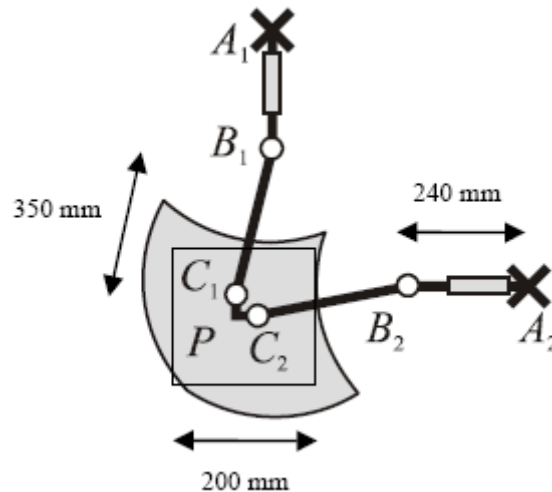


Рис. 1.17 Розміри робочої зони ортоглайда

Розрізняють верстати паралельної кінематики, які використовують штанги постійної довжини і верстати із штангами змінної довжини.

Двохкоординатні механізми із штангами змінної довжини (біпод) та штангами постійної довжини (біглайд) забезпечують плоско-паралельне переміщення робочого органа в одній площині. На основі таких механізмів реалізовані перспективні моделі металорізальних верстатів.

Верстат із трьома штангами змінної довжини (трипод) є перспективним схемним рішенням. Він має додаткову центральну штангу, яка забезпечує

необхідне положення платформи в просторі. Центральна штанга встановлюється вертикально або під кутом.

Перші зразки верстатів-триподів знаходяться в експлуатації з 90-х років. Вони підтвердили свою високу ефективність.

Верстат мод. TRIESEPT 805 має три штанги змінної довжини, з'єднані з нерухомою шестикутною рамою за допомогою карданних підвісів. На нижніх кінцях штанг розташовані сферичні опори, з'єднані із рухомою платформою.

Платформа має 5 ступенів вільності. Три з них забезпечено штангами змінної довжини, а дві забезпечуються центральною штангою. Центральна штанга має постійну довжину і обертається навколо двох осей в нерухомій шестикутній рамі.

Розглянуто верстат - гексапод із штангами змінної довжини. Верстат має шість автономних електромеханічних приводів з ходом 400 мм. Вони являють собою електродвигуни з порожнистим ротором, суміщений з прецизійною передачею гвинт-гайка кочення. Кожен електромеханічний привод має системи виміру положення і швидкості, а також електромеханічний тормоз. Верстат має 5 керованих ступенів вільності. Траєкторія осі шпинделя програмується в системі координат деталі. Положення шпинделя в довільній точці визначається трьома лінійними координатами кінця інструмента та двома кутовими координатами, що визначають кут нахилу інструмента.

Визначені особливості робочого простору верстата. Для опису робочого простору використані просторові графіки у вигляді ліній постійного рівня лінійних та кутових координат.

Розглянута методика і результати вимірів жорсткісних параметрів верстата. Показано, що жорсткість платформи при дії сили прикладеної в її центрі перпендикулярно площині платформи складає близько 45 Н/мкм.

Пропозиції по підвищенню жорсткості включають вдосконалення конструкції шарнірних опор шляхом підвищення їх жорсткості та підвищення жорсткості платформи і штанг.

Приведені динамічні характеристики верстата. Показано, що амплітудно-частотна характеристика має резонансні частоти 20 Гц (головний резонанс), 28, 38, 54, 60, 74, 82 Гц. В динамічних режимах мають місце складні коливання платформи одночасно поступальні та поперечно кутові.

Динамічна похибка траєкторії руху робочого органу верстата визначена при обробці прямого кута. Динамічна похибка при цьому не перевищувала 0,3 мм.

Загальні похибки верстата визначаються шляхом обробки контрольних деталей. Некруглість оброблюваного отвору діаметром 50 мм і зовнішньої циліндричної поверхні діаметром 30 мм при контурному фрезеруванні складають 25 мкм. Точність взаємного розташування вісей отворів знаходиться в межах 30 мкм.

В статті [8] розглянуто основні технічні характеристики горизонтально-оброблюваного центра побудованого на основі механізмів паралельної структури.

В даній конструкції використана жорстка рама на внутрішніх частинах якої знаходиться прецизійні напрямні кочення. В якості приводів застосовані електромеханічні приводи з водяним охолодженням електродвигунів і передачами гвинт-гайка кочення. Шпиндельний блок верстата забезпечує частоту обертання шпинделя 24000 об/хв. При потужності 30 кВт.

Конструкція верстата має високі показники жорсткості. Мінімальне значення жорсткості в робочому просторі верстата складає 120 Н/мкм, що в кілька разів перевищує аналогічні показники токарних і фрезерувальних верстатів.

Конструктивне виконання верстата забезпечує симетричні характеристики теплових деформацій, що значно підвищує показники точності. Загальна точність виходу шпинделя в позицію складає 10 мкм при забезпеченні непрямолінійності переміщень 5 мкм. Ці показники досягаються шляхом спеціальної корекції системи ЧПК. Вона здійснюється наступним чином. Спочатку компенсуються похибки приводів лінійних переміщень. Для цього застосовуються лазерні інтерференційні вимірювачі

точності позиціювання. Для калібровки точних позицій шпинделя у всьому робочому просторі верстата застосовано спеціальний високоточний шаблон, який має набір циліндричних хвостовиків розташованих на площині (рис.11).

Зворотний аналіз зсуву 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора складається з визначення необхідних входів, s_i ($i = 1, 2, 3$), для даного положення, p , рухомої платформи, де p - вектор, направлений від пункту O , щоб вказати P .

Як ніяку особливість обертання, існує для 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора, $A_i B_i$ ($i = 1, 2, 3$) перпендикулярний осі з'єднання S і у будь-який момент, тобто

$$S_i^T [p + b_i^p - (a_{io} + S_i s_i)] = 0 \quad i = 1, 2, 3. \quad (1)$$

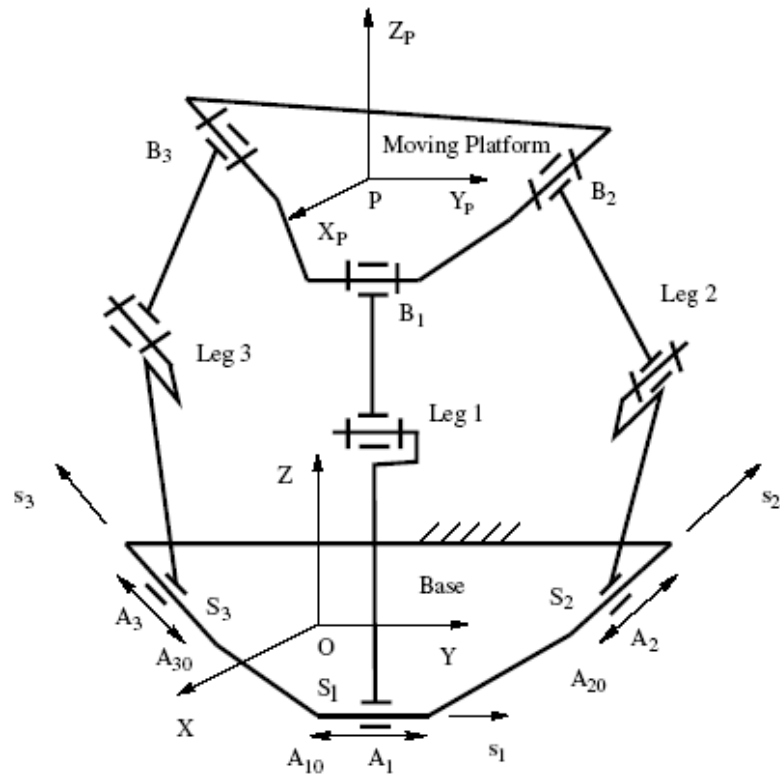


Рис. 1.18 Схематичний зображення 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора

З пр. (1), ми отримуємо вирішення зворотного аналізу зсуву

$$S_i = s_i^T (p + b_i^p - a_{io}) \quad i = 1, 2, 3. \quad (2)$$

Для будь-якого p в межах робочого простору рішення для об'єднаних змінних, що приводяться в дію, S_i , унікально. Проте, там зазвичай існують два набори реальних рішень для об'єднаних змінних пасивних з'єднань R опори CRR. Рішення для об'єднаних змінних з'єднань R опущене тут для ясності, оскільки процедура - фактично те ж саме як зворотний аналіз зсуву плоского 3R послідовний маніпулятор.

Зворотний швидкісний аналіз 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора складається з визначення необхідних швидкостей приводів, \dot{S}_i (dS_i/dt), для даної швидкості, $v = (dp/dt)$, рухомої платформи в даній конфігурації. Диференціація (2) щодо часу, ми отримуємо вирішення зворотного швидкісного аналізу як

$$\dot{S}_i = s_i^T v \quad i=1,2,3. \quad (3)$$

Прямий кінематичний аналіз 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора

Передовий аналіз зсуву 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора складається з визначення положення, p , з рухомої платформи для даного набору входів, S_i ($i = 1, 2, 3$).

Від пр. (1), ми маємо

$$s_i^T p = s_i^T (a_{i0} + S_i s_i - b_i^p) \quad i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

Переписавши пр. (4) у матричній формі, ми маємо

$$Jp = \begin{bmatrix} s_1^T (a_{10} + S_1 s_1 - b_1^p) \\ s_2^T (a_{20} + S_2 s_2 - b_2^p) \\ s_3^T (a_{30} + S_3 s_3 - b_3^p) \end{bmatrix} \quad (5)$$

де

$$|\cos \alpha_i| = |\cos \alpha_2| = |\cos \alpha_3|. \quad (6)$$

Вирішення пр. (5), ми отримуємо вирішення передового аналізу зсуву

$$p = J^{-1} \begin{bmatrix} s_1^T (a_{10} + S_1 s_1 - b_1^p) \\ s_2^T (a_{20} + S_2 s_2 - b_2^p) \\ s_3^T (a_{30} + S_3 s_3 - b_3^p) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Потрібно вказати, що для вектора p отриманого з використанням (7) входів, там зазвичай існують два набори реальних вирішень об'єднаних змінних з'єднань R опори CRR. Якщо ніяке реальне рішення не існує до об'єднаних змінних з'єднань R опори CRR, то набір входів недійсний, оскільки поступально-паралельний маніпулятор не може бути зібраний.

Прямий аналіз швидкостей 3-CRR TPM складається з визначення швидкості, v , рухомої платформи для даного набору швидкостей приводів, S_i ($i = 1, 2, 3$), в даній конфігурації. Переписування пр. (3) у матричній формі, ми маємо

$$\begin{bmatrix} \dot{S}_1 \\ \dot{S}_2 \\ \dot{S}_3 \end{bmatrix} = Jv. \quad (8)$$

Вирішення пр. (8), ми отримуємо вирішення передового швидкісного аналізу

$$v = J^{-1} \begin{bmatrix} \dot{S}_1 \\ \dot{S}_2 \\ \dot{S}_3 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

З пр. (6), ясно, що кожен ряд матриці Якобі, J , є вектором орта, паралельним осі передачі C шарнір. Оскільки осі всіх шарнірів C встановлені, матриця Якобі, J , постійна. Оскільки осі трьох шарнірів C все не співвісні або паралельні загальному напрямку, J є завжди невинятковою і оборотною. Для даного 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора інверсія J є постійною і може бути попередньо обчислена. Таким чином, немає ніякої потреби обчислювати J^{-1} неодноразово у виконанні передового аналізу зсуву і передового швидкісного аналізу 3-CRR TPM. Це спрощує в

значній мірі контроль в реальному часі 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора. Для 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора, в якому перекладні міри свободи шарнірів C приводяться в дію одночасно, пр. (1) – (9) повинно бути вірним. Для 3-CRR ТРКС з плоскою основою і рухомою платформою, осі шарнірів C є компланарними, матриця Якобі, J , таким чином завжди виняткова. Як наслідок, (7) і (9) не вірні. Як побічний ефект, доведено, що, для 3-CRR ППКЛ з плоскою основою і рухомою платформою, всі перекладні міри свободи шарнірів C механізму не можуть бути приведені в дію одночасно.

Особливості зворотного аналізу паралельного маніпулятора відбуваються, коли замовлення крученої системи будь-якої з ділянок зменшується миттєво. Для ділянки траєкторії CRR відбувається зворотна особливість, якщо і тільки якщо осі всіх шарнірів C і R є компланарними. В цьому випадку, ці два вирішення об'єднаної змінної шарнірів R в ділянці траєкторії CRR співпадають один з одним. Ця конфігурація відповідає межі робочого простору.

Коли особливість невпевненості відбувається для паралельного маніпулятора, рухома платформа може піддатися нескінченно малому або кінцевому руху, коли входи замкнуті. Це не доведено нижче за ту ніякій особливості невпевненості, існує для 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора. Відомо, що ніяка особливість обертання не існує для 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора. Таким чином, пр. (8) завжди задовольняється. Особливості невпевненості для 3-CRR ТРМ відбуваються, якщо і тільки якщо J винятковий. Від П 5.3 відомо, що матриця Якобі, J , є невинятковою постійною матрицею. Таким чином, ніяка особливість невпевненості не існує для 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора.

Ізотропний маніпулятор є маніпулятором, у матриці Якобі якого є число умови, рівне 1 у в найменшій кількості однієї з його конфігурацій. У ізотропних конфігураціях маніпулятор виступає дуже добре щодо передачі руху і сили. Ізотропні маніпулятори, запропоновані поки, є ізотропними тільки в маленькій частині їх робочого простору. У наступному ми показуємо

геометричну умову, яка віддає 3-CRR ізотропне поступально-паралельного маніпулятора, і ми доводимо, що ізотропні 3-CRR поступально-паралельні маніпулятори є ізотропними в його цілому робочому просторі. Оскільки кожен ряд Якобіанівської матриці, J , є вектором одиниці, паралельним осі одного шарніру C , можна легко знайти, що, коли осі трьох шарнірів C є ортогональними, 3-CRR поступально-паралельний маніпулятор є ізотропним, тобто число умови матриці Якобі1. Як матриця Якобі, J , 3-CRR поступально-паралельний маніпулятора є постійним, ізотропний 3-CRR поступально-паралельного маніпулятор є ізотропним в своєму цілому робочому просторі. В цьому випадку, оскільки J є ортогональним, ми маємо

$$J^{-1} = J^T. \quad (10)$$

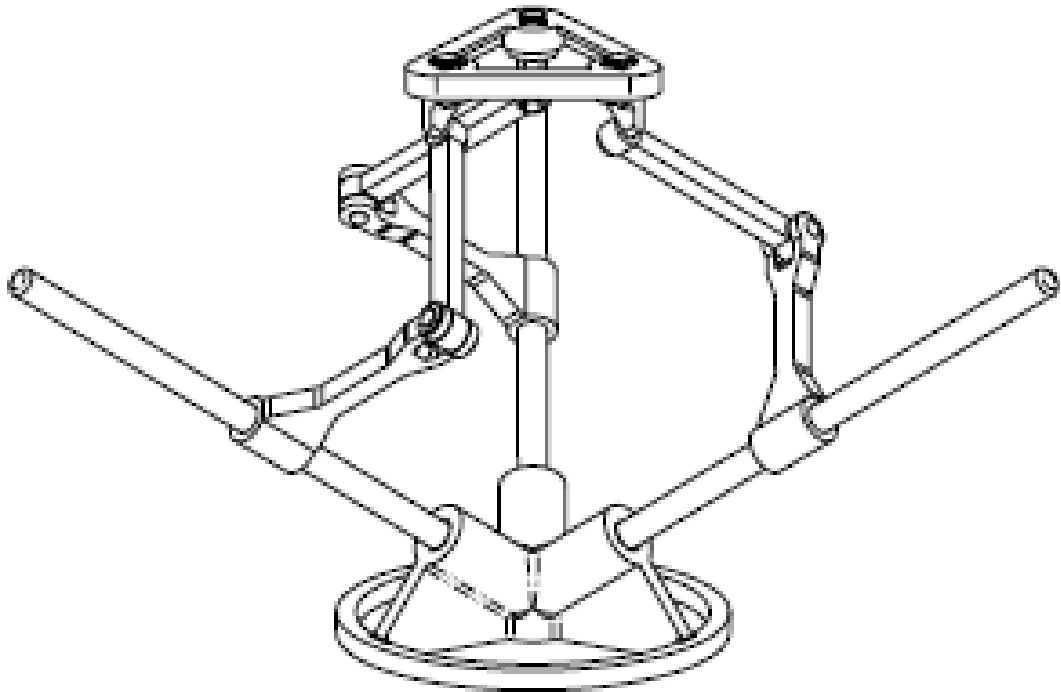


Рис. 1.19 Ізотропний 3-CRR поступально-паралельний маніпулятор

Таким чином, ніяке обчислення не необхідне, щоб отримати інверсію матриці Якобі, виконуючи кінематичний аналіз ізотропного 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора. Крім того, якщо система координат $OXYZ$ прив'язана до основи визначена таким чином, що вектори s_1 , s_2 , і s_3 , відповідно, вирівняні до X -, Y - і $Осі Z$ системи $OXYZ$, тоді матриця Якобі стає ізотропною. Отже, зворотний аналіз переміщення так само як передовий

аналіз зсуву і зв'язані швидкісні проблеми не вимагають ніяких обчислень. Кожним з компонентів перекладу упродовж X-, Y - і Оси Z рухомої платформи безпосередньо управляє один з цих трьох приводів.

Пристрій [7] (рис. 1.20) містить основу, три привода поворотних рухів, розташованих на трьох взаємно перпендикулярних осях тривимірного простору, шарнірно зв'язані з ними три кривошипи, шарнірно зв'язані з кривими першого, другого, третього трикутника, що містять затискні пристосування.

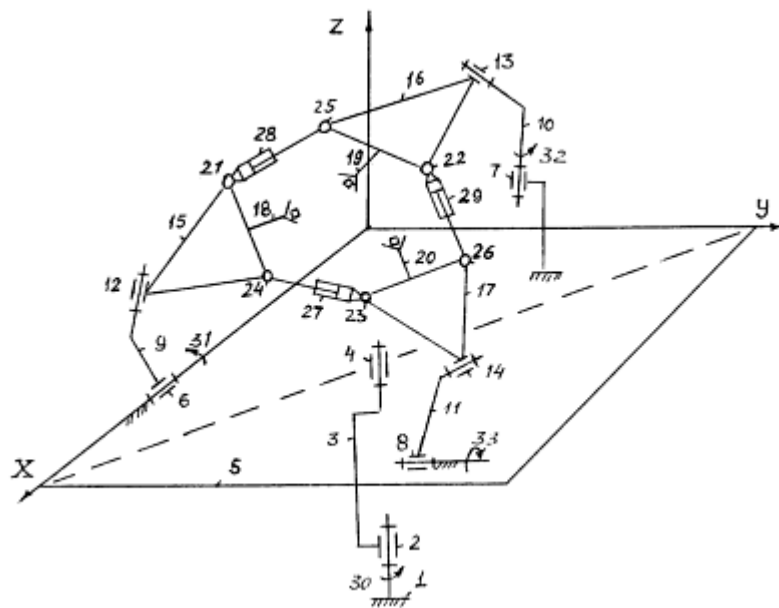


Рис. 1.20 Ізотропний маніпулятор

Пристрій оснащений платформою, приводним важелем з додатковим приводом обертального руху і трьох регулюючих з'єднань, виконаних у вигляді гідроциліндрів і з'єднуючих між собою першого, другого, і третього важелів. При цьому платформа шарнірно з'єднується з трьома кривошипами, привідний важіль шарнірно з'єднано з платформою додаткового приводу поворотних рухів і підстави. Визначення дозволяє створювати регульоване керуючий механізм роботи, що забезпечує однакові приводи ротаційних рухів та регулюючих зв'язків, позиціонування об'єктів різної форми та форми в тривимірному просторі без обмеження маніпуляції.

Робочий простір 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора може бути визначений, використовуючи геометричний підхід. В загальному

випадку геометричний підхід може бути використаний таким чином: робочий простір паралельного маніпулятора - перетин всіх його місць ділянок траєкторії. Тут, місце ділянки траєкторії - область рухливості, дозволена ділянкою траєкторії при дії системи ривка рухомої платформи. Для прикладу місце стержні поступально-паралельного маніпулятора - область рухливості, дозволена ділянкою траєкторії з орієнтацією рухомої платформи, збереженої постійної.

Для 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора кожне місце ділянки траєкторії обмежене двома концентричними циліндрами, осі яких паралельні осі шарніра С, якщо обмеженням на об'єднані рухи і втручання зв'язку нехтують. Радіус зовнішнього циліндра рівний сумі довжин двох зв'язків в тій же самій нозі, тоді як радіус внутрішнього циліндра рівний абсолютній цінності відмінності між довжинами останніх двох зв'язків.

Максимальний робочий простір ізотропного 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора - трициліндр (рис. 1.21), який сформований перетином трьох зовнішніх циліндрів, пересічених під прямим кутом. В цьому випадку, радіус внутрішнього циліндра рівний нулю. (Довжини двох зв'язків в нозі рівні). об'єм максимального робочого простору $8(2-\sqrt{2})r^3$, де r - радіус зовнішнього циліндра.

Щоб усунути обмеження на робочий простір 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора, ми пропонуємо зміну 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора, а саме, 3-PRRR поступально-паралельного маніпулятора (рис. 4а). Відмічено, що в 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора кожен з з'єднань Р в шарнірах С використовується, щоб управляти положенням ланцюга RRR уздовж осі з'єднань R в тій смій ділянці траєкторії.

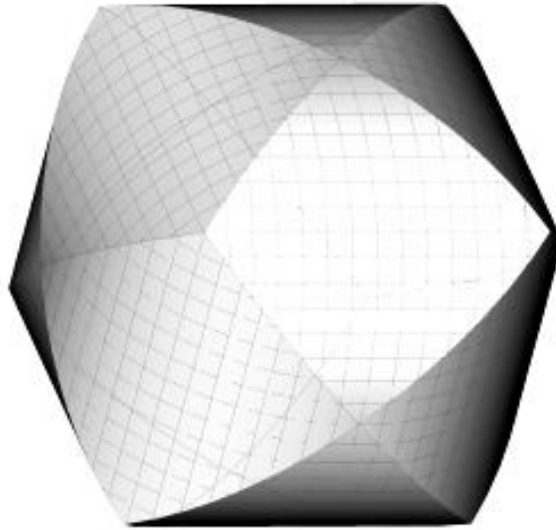


Рис. 1.21 Максимальний робочий простір ізотропного 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора

Не змінюючи функцію з'єднань C , кожен шарнір C в 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора може бути замінений комбінацією одного з'єднання R , вісь якого паралельна осі шарніра C , який буде замінений, так само як один шарнір P , вісь якого не перпендикулярна осі з'єднання C , який буде замінений. 3-PRRR поступально-паралельного маніпулятора таким чином отриманий. Коли осі шарнірів P в 3-PRRR поступально-паралельного маніпулятора влаштовані паралельно, робочий простір маніпулятора збільшиться лінійно із збільшенням удару шарнірів P .

Щоб спростити проектування і виробничий процес, отримуємо поступально-паралельний маніпулятор, а саме, 3-CRRR поступально-паралельний маніпулятор, який є кінематично еквівалентом 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора, запропонований і показаний на рис. 4(б).

3-CRRR TPM отриманий з 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора, вставляючи один шарнір R між рухомою платформою і кожен шарнір R , розташований на рухомій платформі. Вісь кожного з нових шарнірів R не паралельна осям інших шарнірів R в межах тієї ж самої ділянки траєкторії. На додаток до умови на 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора (Розділ 2) вставка шарнірів R повинна задовольнити наступну

умову: три вектори, що кожен є перпендикулярним всім осям шарнірів R в межах даної ділянки траєкторії, не паралельні або розташований на одному загальному літаку. Кожен з вищезазначених векторів представляє керівництво ∞ - ривок подачі передачі ділянки траєкторії CRRR. Додаткова умова гарантує, що немає ніякої особливості обертання для 3-CRRR поступально-паралельного маніпулятора. Фактично, все нові вставлені шарніри R є недіючими. Іншими словами, об'єднані змінні цих нових шарнірів R є інваріантними, як тільки поступально-паралельного маніпулятора зібраний. Таким чином, 3-CRRR поступально-паралельний маніпулятор є кінематичним еквівалентом 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора, тоді як не колишній понад потрібний. Практично, обидва не понад вимушений і над примушених механізму широко використовувалися. Щоб далі порівняти 3-CRR поступально-паралельний маніпулятор з його змінами, деякі дослідні зразки в даний час розвиваються в Лабораторії Робототехніки в Університеті Лавалю.

Ізотропні версії вищезазначених змін 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора можуть також бути отримані і показані на рис. 5. Умови для цих змін 3-CRR поступально-паралельного маніпулятора, щоб бути ізотропними це, осі не недіючих шарнірів R в одній ділянці траєкторії перпендикулярні таким з інших ділянок траєкторії так само як що $|\cos \alpha_1| = |\cos \alpha_2| = |\cos \alpha_3|$. Тут, α_i позначає кут між осями не недіючих шарнірів R і віссю шарнірів P в межах ділянки траєкторії i.

У деяких з поступально-паралельних маніпуляторів, раніше запропонованих в літературі, деякі із зв'язків є такими, що підлягають розтяжно-стискаючим зусиллям тільки. Проте, у всьому поступально-паралельному маніпуляторі, там завжди існують деякі зв'язки, які підпорядковані, щоб скласти зусилля, включаючи вигин. У архітектурі, запропонованій тут, всі зв'язки підпорядковані, щоб скласти зусилля, які зменшать відношення корисного вантажу/ваги і збільшать сили реакції в шарнірах, розташованих на основі. Проте, обережним розглядом цього

обмеження в процесі проекту, вважається, що можуть бути побудовані дуже ефективні дослідні зразки. Наприклад, скорочення тертя в шарнірах, розташованих на основі, є важливою проблемою в здійсненні проекту в даний час у стадії реалізації.

ВИСНОВОК ПО РОЗДІЛУ 1

1. При створенні геометричної моделі механізму маніпулятора мобільного робота слід брати до уваги всі особливості руху подібних механізмів, зокрема наявність сингулярних положень механізму в яких рух взагалі блокується через взаємодію інерційних та кінетостатичних навантажень механізму.

2. Велике різноманіття можливих схем побудови механізмів паралельної кінематики робить практично неможливим створення єдиного і універсального критерію оцінки ефективності та якості тієї чи іншої реалізації компоновання механізму.

3. Побудова геометричної моделі конкретного механізму робить можливим оцінити особливості його кінетостатичних параметрів і характеру динамічних навантажень які виникають при переміщеннях основних вузлів та ланок механізму.

Об'єкт дослідження: кінематичні співвідношення механізму маніпулювання об'єктами маніпулятора мобільного робота побудованого на основі паралельної кінематики

Предмет дослідження особливості кінематичних співвідношень механізму маніпулювання об'єктами маніпулятора мобільного робота побудованого на основі паралельної кінематики.

Мета дослідження побудова ефективної математичної моделі кінематики механізму маніпулювання об'єктами маніпулятора мобільного робота побудованого на основі паралельної кінематики.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Виконати патентно-інформаційний пошук існуючих методів та алгоритмів побудови математичних моделей геометричних та кінематичних співвідношень механізмів паралельної кінематики.
2. Побудувати геометричну та кінематичну модель руху механізму паралельної кінематики.

3. Створити розрахункову процедуру в математичному пакеті Matlab на основі геометричну та кінематичну модель руху механізму паралельної кінематики.
4. Провести модельний експеримент за допомогою розробленої розрахункової процедури.

РОЗДІЛ 2

ГЕОМЕТРИЧНА ТА КІНЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУХУ МЕХАНІЗМУ ПАРАЛЕЛЬНОЇ КІНЕМАТИКИ

Для створення моделі було обрано механізм паралельної структури виконаний за схемою «гексапод» встановлений на поворотній башті бойового мобільного робота «Ласка» рис. 2.1. Робот включає поворотну платформу 2, встановлену на корпусі шасі 1 робота, систему маніпулювання 3 у вигляді просторового механізму типу «Гексапод» та робочої платформи 4. З кожним з цих елементів пов'язана своя власна система координат. Поміж цими системами існує відповідний кінематичний зв'язок. Окрема система координат пов'язана з об'єктом маніпулювання 5.

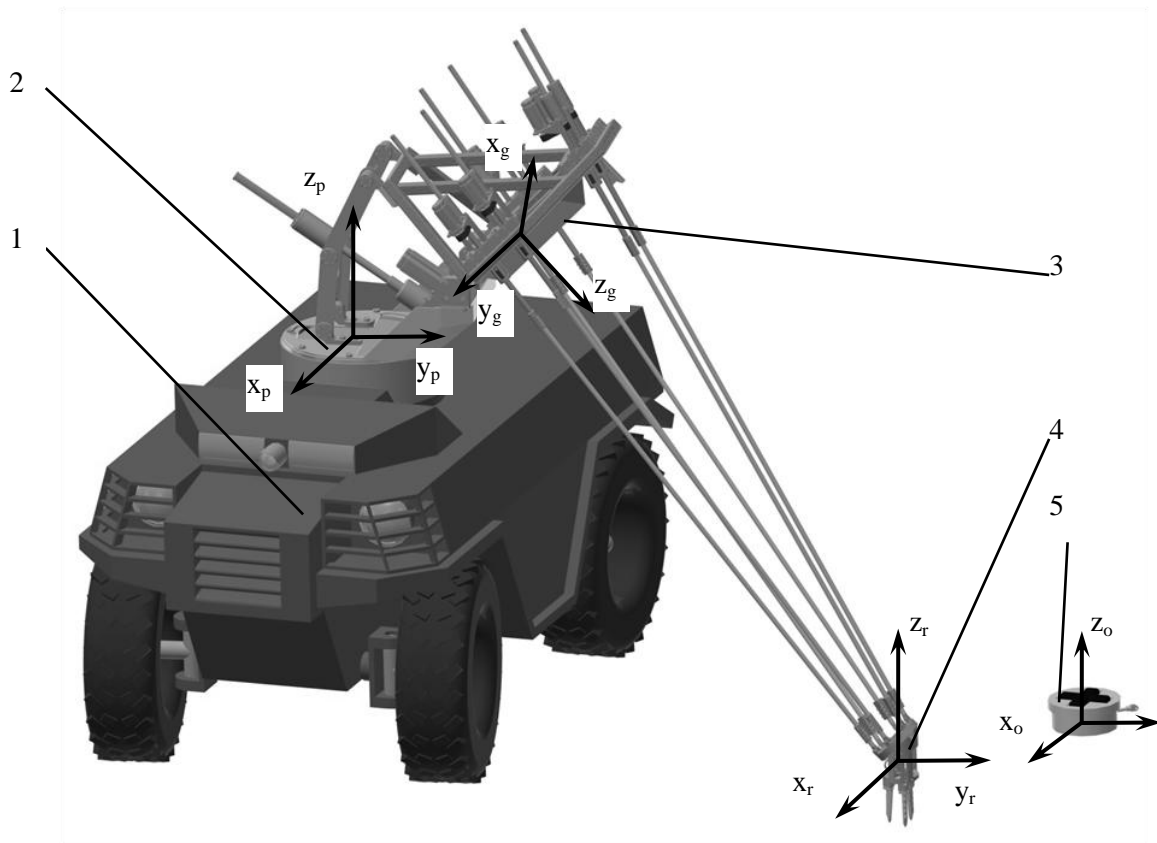


Рис. 2.1 Координатні системи елементів механізму маніпулювання мобільного робота

Приклад визначення залежності координатного перетворення при переході від системи координат обертальної платформи встановленої на

шасі робота $X_p Y_p Z_p O_p$ та системи координат бази механізму «Гексапод» $X_g Y_g Z_g O_g$ (схема розрахункова рис. 2.2).

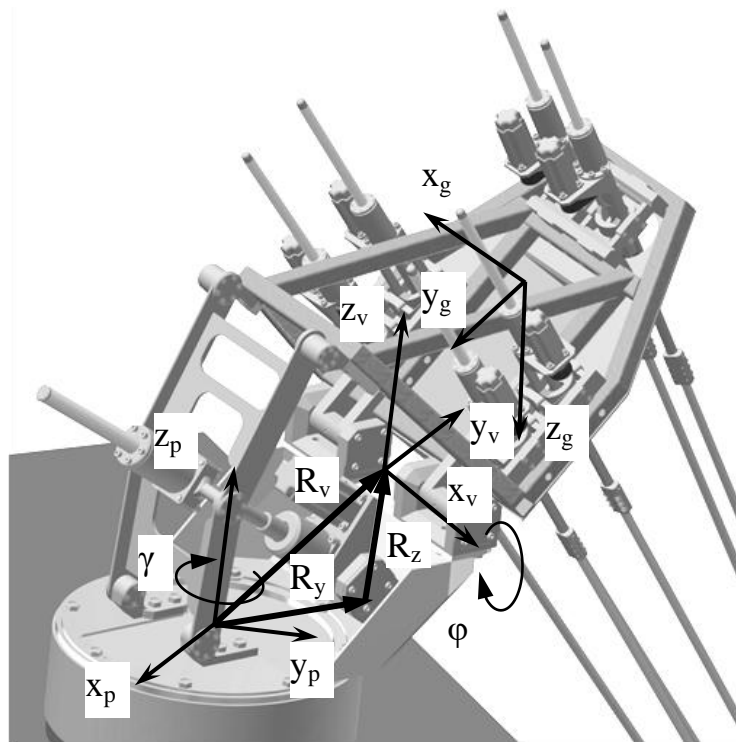


Рис. 2.2 Перехід від системи координат обертальної платформи шасі робота $X_p Y_p Z_p O_p$ та системи координат бази механізму «Гексапод» $X_g Y_g Z_g O_g$

Залежність що визначає координатні перетворення при переході від системи координат $X_p Y_p Z_p O_p$ платформи до системи координат $X_g Y_g Z_g O_g$ має вигляд матричного добутку

$$\begin{bmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \end{bmatrix} = A(\gamma, R_y, R_z, \varphi) \times \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix},$$

де $A(\gamma, R_y, R_z, \varphi)$ - оператор матричного рівняння, який визначає два обертання навколо осі Z та обертання навколо осі X , лінійне переміщення вздовж осі Y , і ще одне лінійне переміщення вздовж осі Z .

$$A(\gamma, R_y, R_z, \varphi) = \begin{pmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) \cdot \cos(\varphi) & \sin(\gamma) \cdot \sin(\varphi) & -R_y \cdot \sin(\gamma) \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) \cdot \cos(\varphi) & -\cos(\gamma) \cdot \sin(\varphi) & R_y \cdot \cos(\gamma) \\ 0 & \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & R_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Математичний опис руху ланок механізму почнемо з опису руху в сферичних кінематичних пар

а) У випадку сферичного з'єднання може застосовуватись два основних варіанти матриці переходу A_i . В обох випадках сферичне з'єднання замінюється еквівалентним шарнірним:

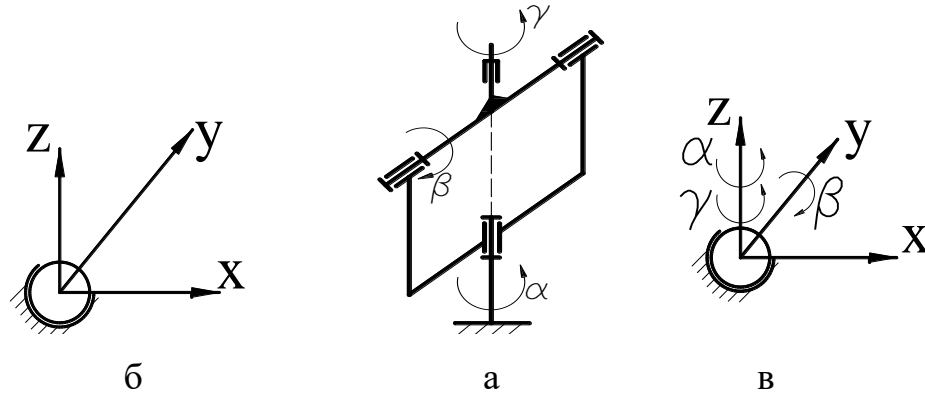


Рис. 2.3 Представлення сферичних кінематичних пар

α, β, γ – кути Ейлера

α – поворот навколо осі z

β – поворот навколо осі y

γ – поворот навколо осі x

$$A_s = A^6(\alpha) \cdot A^5(\beta) \cdot A^6(\gamma)$$

$$A_s = \begin{vmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} (\cos \alpha \cos \beta \cos \gamma - \sin \alpha \sin \gamma) & -(\cos \alpha \cos \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma) & \cos \alpha \sin \beta & 0 \\ (\sin \alpha \cos \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma) & -(\sin \alpha \cos \beta \sin \gamma - \cos \alpha \cos \gamma) & \sin \alpha \sin \beta & 0 \\ -\sin \beta \cos \gamma & \sin \beta \sin \gamma & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

б) α', β', γ' – кути Ейлера

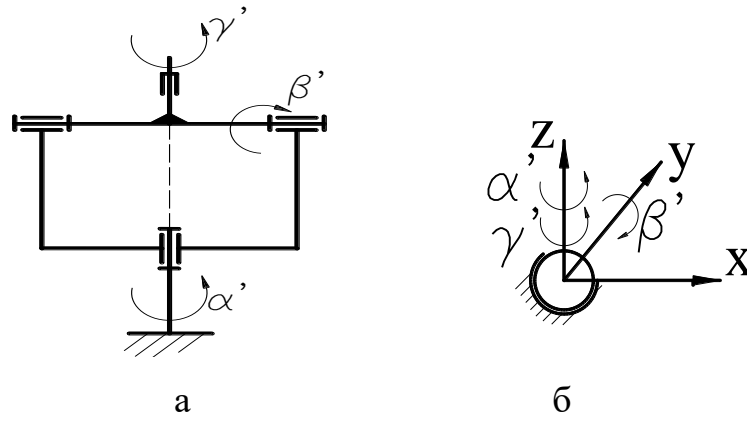


Рис 2.4 Кути Ейлера

α' – поворот навколо осі z

β' – поворот навколо осі y

γ' – поворот навколо осі z

Зв'язок з а):

$$\alpha' = \alpha + \frac{\pi}{2}; \beta' = \beta; \gamma' = \gamma - \frac{\pi}{2}$$

$$A_s = A^6(\alpha) \cdot A^4(\beta) \cdot A^6(\gamma)$$

в) Послідовні повороти навколо трьох різних осей:

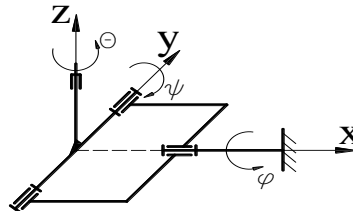


Рис. 2.5 Кути Ейлера для триступеневого шарніра

– поворот навколо осі $x \rightarrow \varphi$

– поворот навколо осі $y \rightarrow \psi$

– поворот навколо осі $z \rightarrow \theta$

$$A_s = A^4(\varphi) \cdot A^5(\psi) \cdot A^6(\theta)$$

$$A_s = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\cos \psi \sin \theta & \sin \psi & 0 \\ (\sin \varphi \sin \psi \cos \theta + \cos \varphi \sin \theta) & -(\sin \varphi \sin \psi \sin \theta - \cos \varphi \cos \theta) & -\sin \varphi \cos \psi & 0 \\ -(\cos \varphi \sin \psi \cos \theta - \sin \varphi \sin \theta) & (\cos \varphi \sin \psi \sin \theta + \sin \varphi \cos \theta) & \cos \varphi \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Механізм паралельної кінематики паралельної структури

Узагальнені координати: q_1, q_2, q_3, q_4 ,

Проміжні координати: кути Ейлера

1) Шарніри **A, B, C**:

φ – поворот навколо осі z

ψ – поворот навколо осі y

2) Шарніри **D, E, F**:

φ – поворот навколо осі z

ψ – поворот навколо осі y

F_5 θ – поворот навколо осі z

$$T_{\Pi_1} = \begin{vmatrix} \dot{i}_{x_1} & \dot{j}_{x_1} & \dot{k}_{x_1} & x_{\Pi_1} \\ \dot{i}_{y_1} & \dot{j}_{y_1} & \dot{k}_{y_1} & y_{\Pi_1} \\ \dot{i}_{z_1} & \dot{j}_{z_1} & \dot{k}_{z_1} & z_{\Pi_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$s \rightarrow \sin; c \rightarrow \cos$

$$\dot{i}_{x_1} = c\varphi_{A_1} \cdot c\psi_{A_1} \cdot (c\varphi_{D_1} \cdot c\psi_{D_1} \cdot c\theta_{D_1} - s\varphi_{D_1} \cdot s\theta_{D_1}) - s\varphi_{A_1} \cdot (s\varphi_{D_1} \cdot c\psi_{D_1} \cdot c\theta_{D_1} - c\varphi_{D_1} \cdot s\theta_{D_1}) - c\varphi_{A_1} \cdot s\psi_{A_1} \cdot s\psi_{D_1} \cdot c\theta_{D_1}$$

$$\dot{j}_{x_1} = -c\varphi_{A_1} \cdot c\psi_{A_1} \cdot (c\varphi_{D_1} \cdot c\psi_{D_1} \cdot s\theta_{D_1} - s\varphi_{D_1} \cdot s\theta_{D_1}) - s\varphi_{A_1} \cdot (s\varphi_{D_1} \cdot c\psi_{D_1} \cdot s\theta_{D_1} - c\varphi_{D_1} \cdot s\theta_{D_1}) + c\varphi_{A_1} \cdot s\varphi_{A_1} \cdot s\varphi_{D_1} \cdot s\theta_{D_1}$$

$$\dot{k}_{x_1} = c\varphi_{A_1} \cdot c\psi_{A_1} \cdot c\varphi_{D_1} \cdot c\psi_{D_1} - s\varphi_{A_1} \cdot s\varphi_{D_1} \cdot s\theta_{D_1} + c\varphi_{A_1} \cdot c\psi_{A_1} \cdot c\psi_{D_1}$$

$$\dot{i}_{y_1} = s\varphi_{A_1} \cdot c\psi_{A_1} \cdot (c\varphi_{D_1} \cdot c\psi_{D_1} \cdot c\theta_{D_1} - s\varphi_{D_1} \cdot s\theta_{D_1}) + c\varphi_{A_1} \cdot (s\varphi_{D_1} \cdot c\psi_{D_1} \cdot c\theta_{D_1} + c\varphi_{D_1} \cdot s\theta_{D_1}) - s\varphi_{A_1} \cdot s\psi_{A_1} \cdot s\psi_{D_1} \cdot c\theta_{D_1}$$

$$\dot{j}_{y_1} = -s\varphi_{A_1} \cdot c\psi_{A_1} \cdot (c\varphi_{D_1} \cdot c\psi_{D_1} \cdot s\theta_{D_1} + s\varphi_{D_1} \cdot c\theta_{D_1}) + c\varphi_{A_1} \cdot (-s\varphi_{D_1} \cdot c\psi_{D_1} \cdot s\theta_{D_1} + c\varphi_{D_1} \cdot c\theta_{D_1}) + s\varphi_{A_1} \cdot s\psi_{A_1} \cdot s\psi_{D_1} \cdot s\theta_{D_1}$$

$$k_{y_1} = c\varphi_{A_1} \cdot c\psi_{A_1} \cdot c\varphi_{D_1} \cdot c\psi_{D_1} + c\varphi_{A_1} \cdot s\varphi_{D_1} \cdot s\psi_{D_1} + s\varphi_{A_1} \cdot s\psi_{A_1} \cdot c\psi_{D_1}$$

$$i_{z_1} = -s\psi_{A_1} \cdot (c\varphi_{D_1} \cdot c\psi_{D_1} \cdot c\theta_{D_1} - s\varphi_{D_1} \cdot s\theta_{D_1}) + c\psi_{A_1} \cdot s\psi_{D_1} \cdot c\theta_{D_1}$$

$$j_{z_1} = s\psi_{A_1} \cdot (c\varphi_{D_1} \cdot c\psi_{D_1} \cdot s\theta_{D_1} + s\varphi_{D_1} \cdot c\theta_{D_1}) + c\psi_{A_1} \cdot s\psi_{D_1} \cdot s\theta_{D_1}$$

$$k_{z_1} = -s\psi_{A_1} c\varphi_{D_1} \cdot s\psi_{D_1} + c\psi_{A_1} \cdot c\psi_{D_1}$$

$$x_{\Pi_1} = R_0 + q_1 \cdot c\varphi_A \cdot s\psi_A - R_{\Pi} \cdot i_{x_1}$$

$$y_{\Pi_1} = q_1 \cdot s\varphi_A \cdot s\psi_A - R_{\Pi} \cdot i_{y_1}$$

$$x_{\Pi_1} = q_1 \cdot c\psi_A - R_{\Pi} \cdot i_{z_1}$$

або

$$\bar{R}_{\Pi} = \bar{R}_{0A_1} + \bar{R}_1 + \bar{R}_{D_1\Pi} = \begin{vmatrix} R_0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} + q_1 \begin{vmatrix} c\varphi_A \cdot c\psi_A \\ s\varphi_A \cdot s\psi_A \\ c\psi_A \end{vmatrix} - R_{\Pi} \begin{vmatrix} i_{x_1} \\ i_{y_1} \\ i_{z_1} \end{vmatrix}$$

$$\bar{R}_{D_1} = \begin{vmatrix} x_{D_1} \\ y_{D_1} \\ z_{D_1} \\ 1 \end{vmatrix}$$

$$x_{D_1} = R_0 + q_1 \cdot c\varphi_A \cdot s\psi_A$$

$$y_{D_1} = q_1 \cdot s\varphi_A \cdot s\psi_A$$

$$z_{D_1} = q_1 \cdot c\psi_A$$

або

$$\bar{R}_{D_1} = \bar{R}_{0A_1} + \bar{R}_1 = \begin{vmatrix} R_0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} + q_1 \begin{vmatrix} c\varphi_{A_1} \cdot s\psi_{A_1} \\ s\varphi_{A_1} \cdot s\psi_{A_1} \\ c\psi_{A_1} \end{vmatrix}$$

Пряма задача про положення

Кінематичний ланцюг 1:

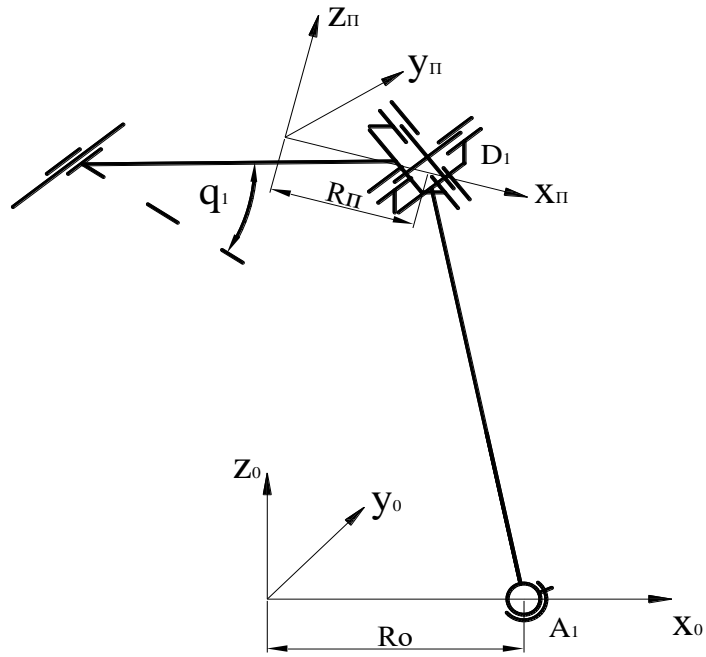


Рис. 2.6 Координатний ланцюг 1

q_I – узагальнена координата

проміжні координати: шарнір A_I : $\varphi_{A_1}, \psi_{A_1}$

шарнір D_I : $\varphi_{D_1}, \psi_{D_1}, \theta_{D_1}$

$$T_{II_1} = A^1(R_0) \cdot A_{SA_1}(\varphi_{A_1}, \psi_{A_1}) \cdot A^3(q_1) \cdot A_{SD_1}(\varphi_{D_1}, \psi_{D_1}) \cdot A^1(-R_{II})$$

$$A^1(R_0) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & R_0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

$$A^1(-R_{II}) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & -R_{II} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

$$A^3(q_1) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$A_{SA_1} = \begin{vmatrix} \cos \varphi_{A_1} \cos \psi_{A_1} & \sin \varphi_{A_1} & \cos \varphi_{A_1} \sin \psi_{A_1} & 0 \\ \sin \varphi_{A_1} \cos \psi_{A_1} & \cos \varphi_{A_1} & \sin \varphi_{A_1} \sin \psi_{A_1} & 0 \\ \sin \psi_{A_1} & 0 & \cos \psi_{A_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$A_{SD_1} = \begin{vmatrix} (\cos \varphi_{D_1} \cos \psi_{D_1} \cos \theta_{D_1} - \sin \varphi_{D_1} \sin \theta_{D_1}) & -(\cos \varphi_{D_1} \cos \psi_{D_1} \cos \theta_{D_1} - \sin \varphi_{D_1} \sin \theta_{D_1}) & \cos \varphi_{D_1} \sin \psi_{D_1} & 0 \\ (\sin \varphi_{D_1} \cos \psi_{D_1} \cos \theta_{D_1} + \cos \varphi_{D_1} \cos \theta_{D_1}) & (-\sin \varphi_{D_1} \cos \psi_{D_1} \sin \theta_{D_1} + \cos \varphi_{D_1} \cos \theta_{D_1}) & \sin \varphi_{D_1} \sin \psi_{D_1} & 0 \\ -\sin \varphi_{D_1} \cos \theta_{D_1} & \sin \psi_{D_1} \sin \theta_{D_1} & \cos \psi_{D_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\bar{R}_{D_1} = \bar{R}_{0A_1} + \bar{R}_1 = \begin{vmatrix} R_0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} + q_1 \begin{vmatrix} \cos \varphi_{A_1} \cdot \sin \psi_{A_1} \\ \sin \varphi_{A_1} \cdot \sin \psi_{A_1} \\ \cos \psi_{A_1} \end{vmatrix}$$

$$\bar{R}_{\Pi} = \bar{R}_{D_1} + \bar{R}_{D_1 \Pi_1} = \bar{R}_{D_1} - \bar{R}_{\Pi} \cdot \vec{i}_1$$

За аналогією записуються матриці переходу T_{Π_i} для решти кінематичних ланцюгів. Узагальнена форма запису:

$$T_{\Pi_n} = A_{0_n} \cdot A_{S_{0n}} \cdot A_{q_n} \cdot A_{S\Pi_n} \cdot A_{\Pi_n}$$

де A_{0_n} – матриці переходу від системи x_0, y_0, z_0 до системи x_{0n}, y_{0n}, z_{0n} розміщення шарнірів R на основі

$A_{S_{0n}}$ – матриці переходу для шарнірів кінематичних ланцюгів на основі

A_{q_n} – матриці переходу для привідних кінематичних ланцюгів

$A_{S\Pi_n}$ – матриці переходу для кінематичних ланцюгів на платформах

A_{Π_n} – матриці переходу до системи

1) Матриці A_{0_n}

$$A_{01} = A_{02} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & R_0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \text{ (шарніри } A_1, A_2)$$

$$A_{03} = A_{04} = A^6(120^\circ) \cdot A^1(R_0) = \begin{vmatrix} \cos 120^\circ & -\sin 120^\circ & 0 & 0 \\ \sin 120^\circ & \cos 120^\circ & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & R_0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$A_{03} = A_{04} = \begin{vmatrix} -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & -\frac{R_0}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & R_0 \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \text{ (шарніри } B_3, B_4)$$

$$A_{05} = A_{06} = A^6(-120^\circ) \cdot A^1(R_0)$$

$$A_{05} = A_{06} = \begin{vmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & -\frac{R_0}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & -R_0 \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \text{ (шарніри } C_5, C_6)$$

2) Матриці A_{S_0n}

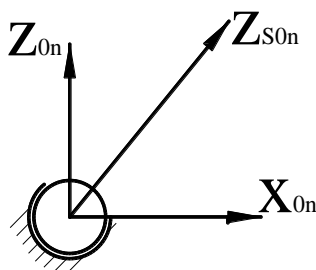


Рис. 2.7 Шарнір C_4

$$A_{S_0n} = \begin{vmatrix} \cos \varphi_{n_0} \cos \psi_{n_0} & -\sin \varphi_{n_0} & \cos \varphi_{n_0} \sin \psi_{n_0} & 0 \\ \sin \varphi_{n_0} \cos \psi_{n_0} & \cos \varphi_{n_0} & \sin \varphi_{n_0} \sin \psi_{n_0} & 0 \\ -\sin \psi_{n_0} & 0 & \cos \psi_{n_0} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

де для:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &\rightarrow \varphi_{n_0} = \varphi_{A_1}; \psi_{n_0} = \psi_{A_1} \\ A_2 &\rightarrow \varphi_{n_0} = \varphi_{A_2}; \psi_{n_0} = \psi_{A_2} \\ B_3 &\rightarrow \varphi_{n_0} = \varphi_{B_3}; \psi_{n_0} = \psi_{B_3} \\ B_4 &\rightarrow \varphi_{n_0} = \varphi_{B_4}; \psi_{n_0} = \psi_{B_4} \\ C_5 &\rightarrow \varphi_{n_0} = \varphi_{C_5}; \psi_{n_0} = \psi_{C_5} \\ C_6 &\rightarrow \varphi_{n_0} = \varphi_{C_6}; \psi_{n_0} = \psi_{C_6} \end{aligned} \right\}$$

проміжні координати кінематичних ланцюгів **КЛ1**÷ **КЛ6**

3) Матриці A_{q_n}

$$Aq_n = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

де q_n ($n=1\div 6$) узагальнені координати кінематичних ланцюгів **КЛ1**÷ **КЛ6**

4) Матриці $A_{S\Pi_n}$ для:

$$\begin{aligned} D_1 &\rightarrow \varphi_{\Pi_0} = \varphi_{D_1}; \psi_{\Pi_0} = \psi_{D_1}; \theta_{\Pi_0} = \theta_{D_1} \\ E_2 &\rightarrow \varphi_{\Pi_0} = \varphi_{E_2}; \psi_{\Pi_0} = \psi_{E_2}; \theta_{\Pi_0} = \theta_{E_2} \\ E_3 &\rightarrow \varphi_{\Pi_0} = \varphi_{E_3}; \psi_{\Pi_0} = \psi_{E_3}; \theta_{\Pi_0} = \theta_{E_3} \\ F_4 &\rightarrow \varphi_{\Pi_0} = \varphi_{F_4}; \psi_{\Pi_0} = \psi_{F_4}; \theta_{\Pi_0} = \theta_{F_4} \\ F_5 &\rightarrow \varphi_{\Pi_0} = \varphi_{F_5}; \psi_{\Pi_0} = \psi_{F_5}; \theta_{\Pi_0} = \theta_{F_5} \\ D_6 &\rightarrow \varphi_{\Pi_0} = \varphi_{D_6}; \psi_{\Pi_0} = \psi_{D_6}; \theta_{\Pi_0} = \theta_{D_6} \end{aligned}$$

$$A_{s\Pi_n} = \begin{vmatrix} (\cos \varphi_{\Pi_n} \cos \psi_{\Pi_n} \cos \theta_{\Pi_n} - & -(\cos \varphi_{\Pi_n} \cos \psi_{\Pi_n} \cos \theta_{\Pi_n} + & \cos \varphi_{\Pi_n} \sin \psi_{\Pi_n} & 0 \\ -\sin \varphi_{\Pi_n} \sin \theta_{\Pi_n}) & +\sin \varphi_{\Pi_n} \sin \theta_{\Pi_n}) & & \\ (\sin \varphi_{\Pi_n} \cos \psi_{\Pi_n} \cos \theta_{\Pi_n} + & (-\sin \varphi_{\Pi_n} \cos \psi_{\Pi_n} \sin \theta_{\Pi_n} + & \sin \varphi_{\Pi_n} \sin \psi_{\Pi_n} & 0 \\ +\cos \varphi_{\Pi_n} \cos \theta_{\Pi_n}) & +\cos \varphi_{\Pi_n} \cos \theta_{\Pi_n}) & & \\ -\sin \psi_{\Pi_n} \cos \theta_{\Pi_n} & \sin \psi_{\Pi_n} \sin \theta_{\Pi_n} & \cos \psi_{\Pi_n} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

5) Матриці A_{Π_n}

$$A_{\Pi_1} = A_{\Pi_6} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & -R_{\Pi} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (\text{шарніри } D_1, D_6)$$

$$A_{\Pi_2} = A_{\Pi_3} = A^1(-R_{\Pi}) \cdot A^6(-120^\circ)$$

$$A_{\Pi_2} = A_{\Pi_3} = \begin{vmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & -R_{\Pi} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (\text{шарніри } E_2, E_3)$$

$$A_{\Pi_4} = A_{\Pi_5} = A^1(-R_{\Pi}) \cdot A^6(120^\circ)$$

$$A_{\Pi_4} = A_{\Pi_5} = \begin{vmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & -R_{\Pi} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (\text{шарніри } F_4, F_5)$$

Для всіх кінематичних ланцюгів $T_{\Pi_n} = const$; тобто

$$T_{\Pi_1} = T_{\Pi_2} = T_{\Pi_3} = T_{\Pi_4} = T_{\Pi_5} = T_{\Pi_6}$$

Загальна структура T_{Π_n} :

$$T_{\Pi_n} = \begin{vmatrix} i_{x_n} & j_{x_n} & k_{x_n} & \vdots & x_{\Pi_n} \\ i_{y_n} & j_{y_n} & k_{y_n} & \vdots & y_{\Pi_n} \\ i_{z_n} & j_{z_n} & k_{z_n} & \vdots & z_{\Pi_n} \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} M_n & \vdots & \bar{R}_{\Pi_n} \\ \dots & \vdots & \dots \\ 0^T & \vdots & 1 \end{vmatrix}$$

M_n – матриця направляючих косинусів, що визначає орти $\bar{i}_{\Pi}, \bar{j}_{\Pi}, \bar{k}_{\Pi}$ системи координат $x_{\Pi} y_{\Pi} z_{\Pi}$ платформи в системі $x_0 y_0 z_0$

\bar{R}_{Π_n} – радіус-вектор центру системи координат $x_{\Pi} y_{\Pi} z_{\Pi}$ в системі $x_0 y_0 z_0$

Пряма задача про положення полягає у знаходженні елементів матриці T_{Π_n} для будь-якого кінематичного ланцюга KL_n через узагальнюючу координату q_n і проміжні координати шарнірів $\varphi_{n_0}; \psi_{n_0}; \varphi_{n_{\Pi}}; \psi_{n_{\Pi}}; \theta_{n_{\Pi}}$

Зворотна задача про положення

Зворотна задача про положення полягає у визначенні проміжних і узагальнених координат по кожному кінематичному ланцюгу, що з'єднує привод з основою і платформою.

Для цього рівняння $T_{\Pi_n} = A_{0_n} \cdot A_{S_{0n}} \cdot A_{q_n} \cdot A_{S\Pi_n} \cdot A_{\Pi_n}$

перетворюється до вигляду: $A_{S_{0n}} \cdot A_{q_n} \cdot A_{S\Pi_n} = A_{0_n}^{-1} \cdot T_{\Pi_n} \cdot A_{\Pi_n}^{-1}$ (1)

Для цього випадку матриця $A_{0\Pi_n} = A_{0_n}^{-1} \cdot T_{\Pi_n} \cdot A_{\Pi_n}^{-1}$ для кожного кінематичного ланцюга визначена в загальному вигляді:

$$A_{0\Pi_n} = \begin{vmatrix} M_{0\Pi_n} & \vdots & \bar{R}_{0\Pi_n} \\ \dots & \vdots & \dots \\ 0^T & \vdots & 1 \end{vmatrix}$$

де $\bar{R}_{0\Pi_n}$ – радіус вектор, який визначає положення верхнього шарніра, пов'язаного з платформою відносно нижнього шарніра, пов'язаного з основою.

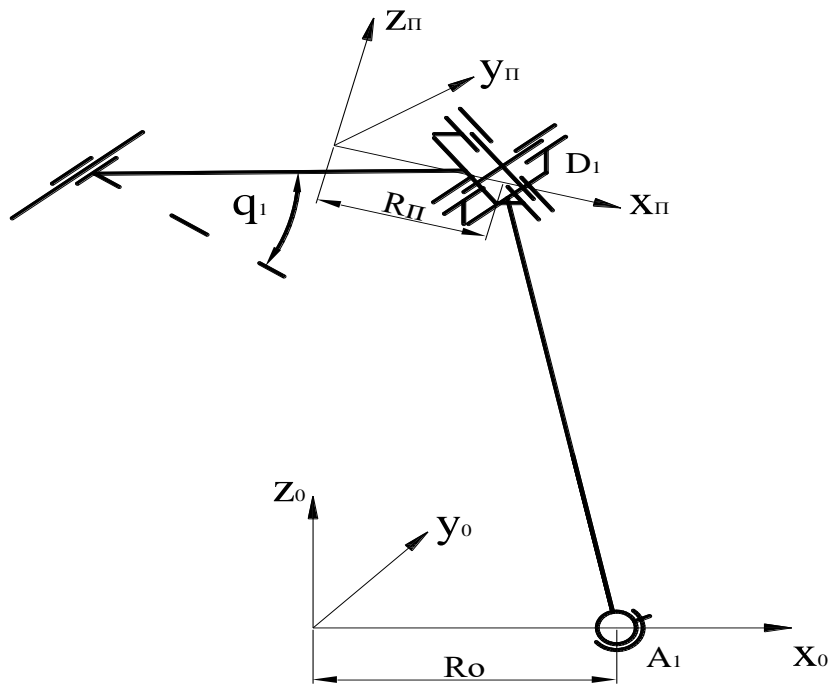


Рис 2.8 Кінематичний ланцюг 3

В цьому випадку координати положення шарніра $S_{\Pi_n} = (x_{0\Pi_n}, y_{0\Pi_n}, z_{0\Pi_n})$ повністю визначаються змінними q_n , φ_{s0n} і ψ_{s0n} для знаходження яких достатньо скласти і розв'язати систему з трьох рівнянь, прирівнявши елементи четвертих стовбців результуючих матриць рівняння (1).

Так

$$R_{0\Pi_n} = \begin{vmatrix} \cos \varphi_{s0n} \cdot \sin \psi_{s0n} \\ \sin \varphi_{s0n} \cdot \sin \psi_{s0n} \\ \cos \psi_{s0n} \end{vmatrix} \cdot q_n$$

тобто розв'язується система рівнянь:

$$\begin{cases} x_{0\Pi_n} = q_n \cos \varphi_{s0n} \sin \psi_{s0n} \\ y_{0\Pi_n} = q_n \sin \varphi_{s0n} \sin \psi_{s0n} \\ z_{0\Pi_n} = q_n \cos \psi_{s0n} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} q_n = \frac{z_{0\Pi_n}}{\cos \psi_{s0n}} \\ \varphi_{s0n} = \arctg \frac{y_{0\Pi_n}}{x_{0\Pi_n}} \\ \psi_{s0n} = \arctg \frac{y_{0\Pi_n}}{z_{0\Pi_n} \cdot \sin \varphi_{s0n}} \end{cases}$$

За значеннями q_n , φ_{s0n} , ψ_{s0n} визначаються значення переміжних координат для шарнірів S_{Π_n} : $\varphi_{S_{\Pi_n}}, \psi_{S_{\Pi_n}}, \theta_{S_{\Pi_n}}$

ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 2

1. Створена геометрична модель механізму переміщення захвату мобільного робота виконаного за схемою паралельної кінематики.
2. Геометричну модель можна використати для побудови розрахункової процедури системи SimMechanics пакету Matlab для здійснення імітаційного моделювання процесу переміщення робочої платформи мобільного робота.
3. Розрахункова процедура дозволить дослідити вплив конструктивних та технічних параметрів на процес переміщення платформи мобільного робота.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МЕХАНІЗМУ ПЕРЕМІЩЕННЯ РОБОЧОГО ОРГАНУ

Моделювання руху робочої платформи механізму захоплення та маніпулювання об'єктами мобільного робота реалізовано за допомогою пакету SimMechanics надбудови Simulink математичної системи Matlab.

Розрахунква процедура створена за допомогою блоків розширення пакету SimMechanics.

SimMechanics це пакет розширення системи Simulink для імітаційного моделювання механічних систем та пристроїв. Його особливість - технічне проектування и моделювання механічних систем з урахуванням як інерційних так і геометричних характеристик механічних об'єктів (в межах законів теоретичної механіки та теорії машин та механізмів). SimMechanics дозволяє моделювати рух в трьох площинах моделюючи всі шість ступенів вільності твердого тіла в тривимірному просторі. SimMechanics містить набір функцій для завдання механічних параметрів вузлів та ланок (маса, моменти інерції, геометричні параметри), кінематичні та геометричні обмеження, системи координат (локальні та глобальні), можливостей завдання і вимірювання параметрів руху. SimMechanics дозволяє створювати моделі механічних систем у вигляді блок-схем (рис.3.1).

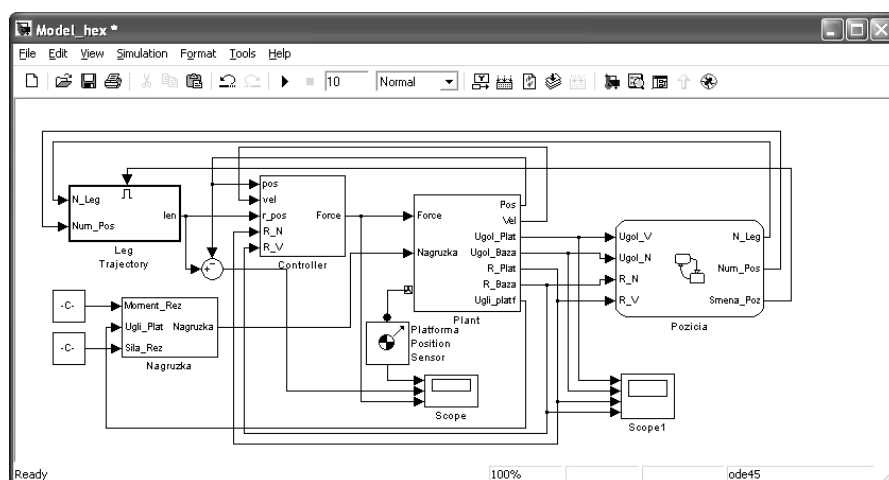


Рис. 3.1 Головний модуль розрахункової процедури

Вхідними даними при моделюванні є навантаження платформи зі сторони об'єкту маніпулювання. В моделі передбачено створення двох основних типів навантаження – крутний момент і осьове зусилля.

В залежності від особливостей моделей значення сили та моменту можуть бути як постійними величинами, так і формуватися додатковим модулем з урахуванням динамічної інерційної складової.

Модуль моделі, що задає сили та моменти, що навантажують платформу механізму затиску об'єкту маніпулювання представлено на рис. 3.2.

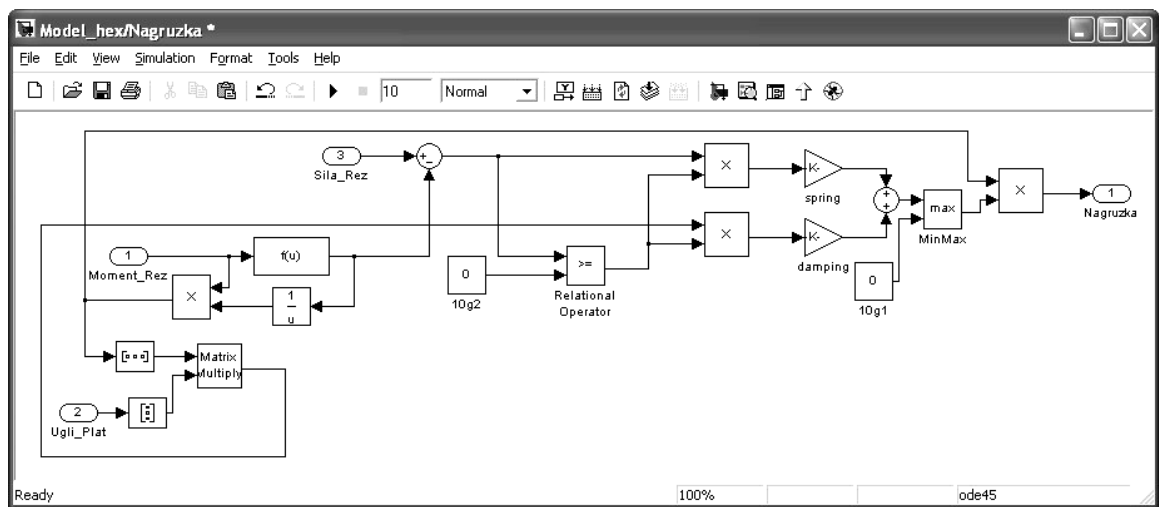


Рис. 3.2 Модуль формування навантаження платформи

Траєкторія руху платформи задається як функція поточних координат кінцевої точки захватного механізму маніпулювання та функції поточних значень кутів нахилу платформи.

При завданні координат переміщення робочого органу умовно за точку переміщення задається точка, що лежить на осі платформи і розташована в площині, що ділить пальці схвата навпіл.

Кути нахилу платформи визначаються відносним положенням рухомої платформи самого робота і початковим положенням об'єкту маніпулювання.

Блок схема моделі формування траєкторії представлена на рис. 3.3.

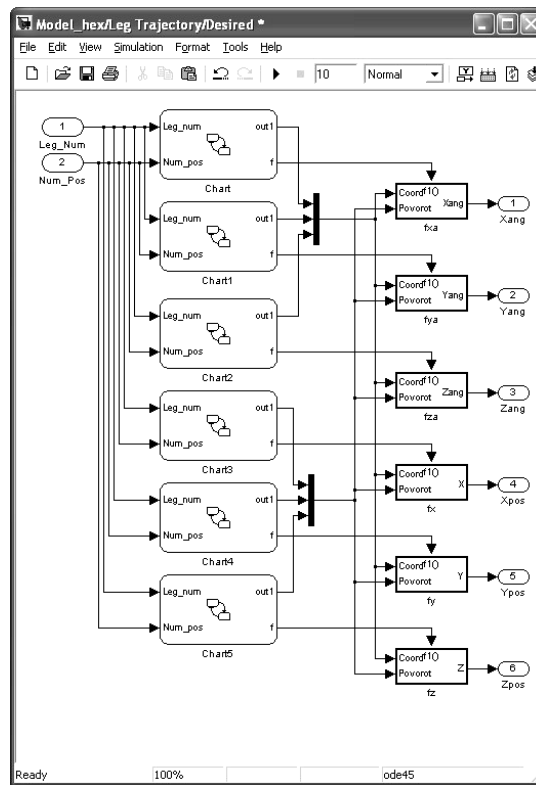


Рис. 3.3 Модуль формування траєкторії руху платформи

Моделювання руху платформи здійснюється за принципом зворотної динаміки. Геометричні характеристики руху визначаються на основі точної геометричної моделі. Потім в розраховані координати вносяться уточнення які враховують динамічні явища, що виникають при русі внаслідок властивостей (інерційних) самої платформи і ланок приводів (рис. 3.4.)

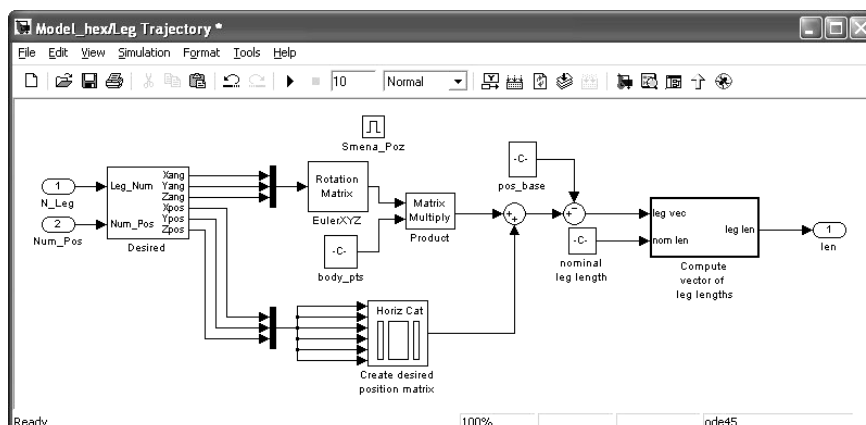


Рис. 3.4 Модуль враховує інерційні властивості платформи і ланок приводів

Моделювання платформи як тривимірного об'єкту з врахуванням його інерційних властивостей здійснюється за допомогою блоків пакету

SimMechanics. Модуль розрахункової процедури, який моделює механічні характеристики всіх рухомих елементів механізму представлений на рис. 3.5.

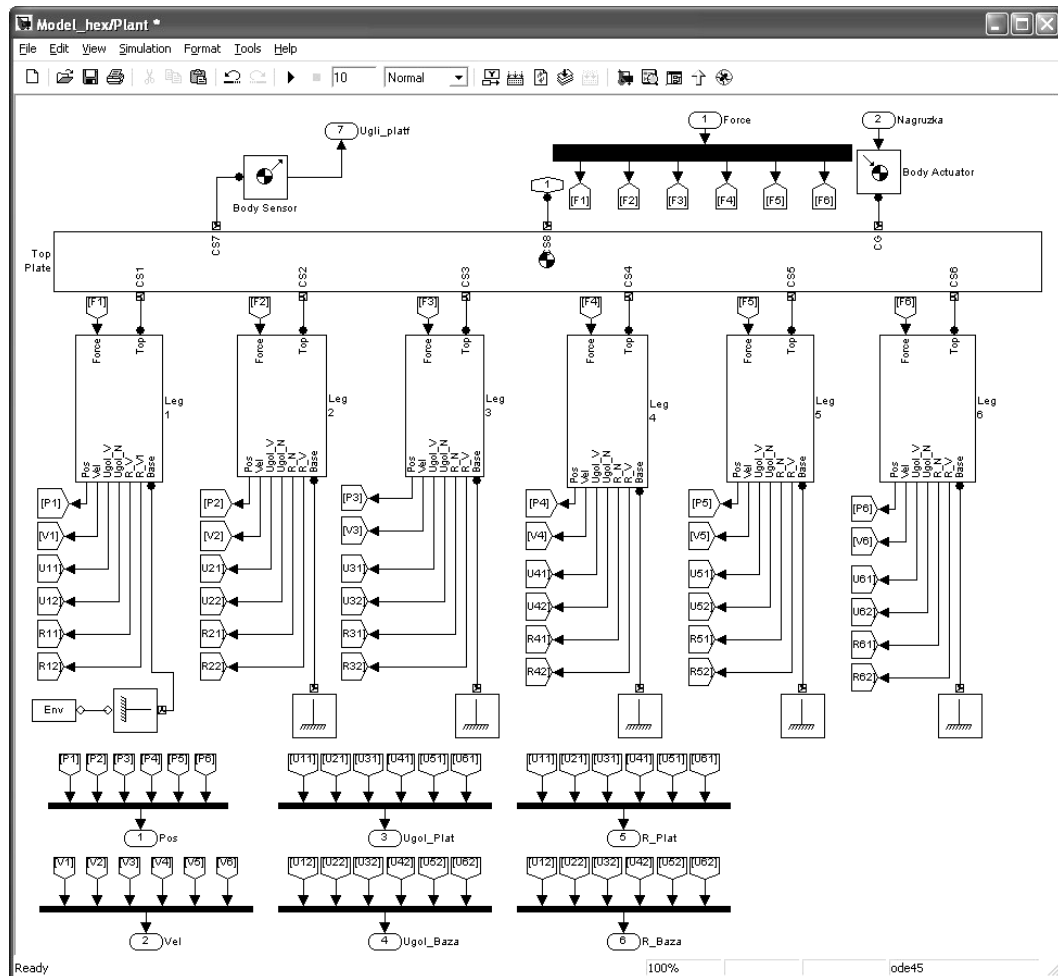


Рис. 3.5 Модуль моделювання інерційних та геометричних характеристик платформи та ланок приводів

На основі розрахунку параметрів руху привідної штанги платформи визначаються кути нахилу штанги а також реакції в шарнірах (рис. 3.6). Отримані значення використовуються при розрахунку параметрів руху привідної штанги.

Розрахунок параметрів руху привідної штанги платформи здійснює модуль моделі представлений на рис 3.7. Модуль використовує ітераційну процедуру вирішуючи обернену задачу кінематики.

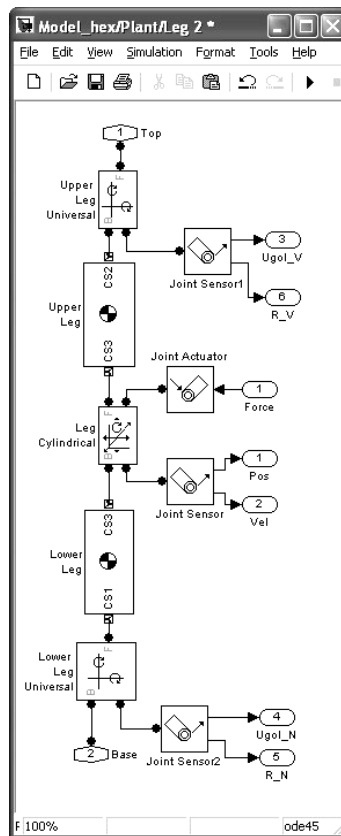


Рис. 3.6 Модуль формування руху штанги

(також визначає реакції опор та кути повороту штанги в шарнірах)

На основі геометричної моделі виконується перерахунок довжин штанг приводів лінійних переміщень (рис. 3.8).

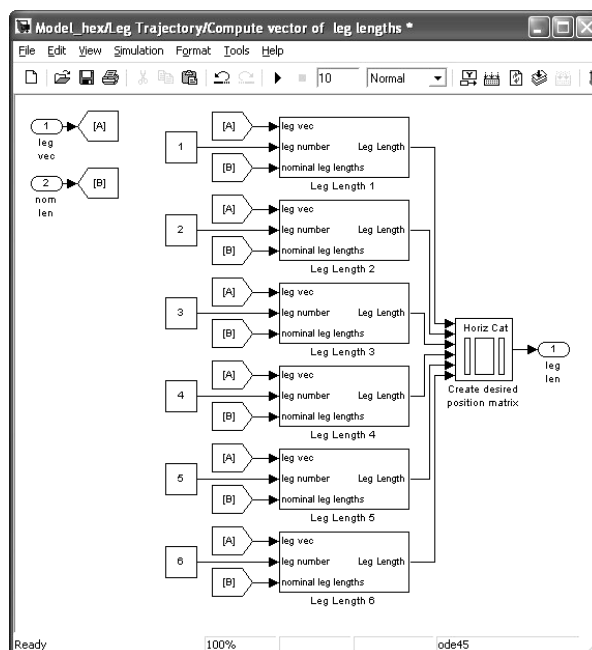


Рис. 3.7 Модуль розрахунку поточних довжин приводних штанг

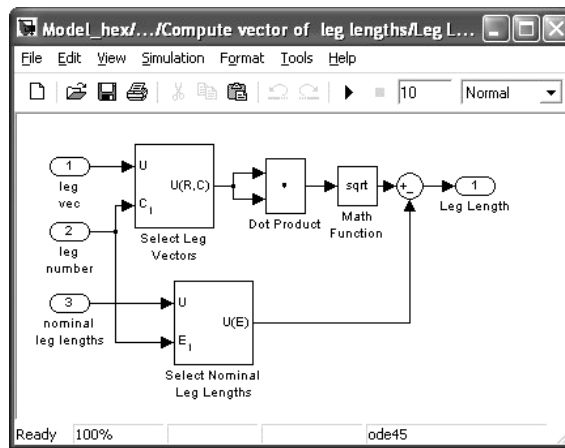


Рис. 3.8 Модуль вибору і - і штанги для завдання її поточної довжини

На основі поточних значень кутів нахилу штанг по відношенню до положення платформи визначається зусилля в приводі поточної штанги (рис. 3.9).

Крім значень статичних зусиль в приводах враховуються інерційні властивості елементів механізму штанги (її верхньої і нижньої частин). Розраховується динамічна складова навантаження і додається до статичного зусилля яке розвиває привід лінійного переміщення штанги.

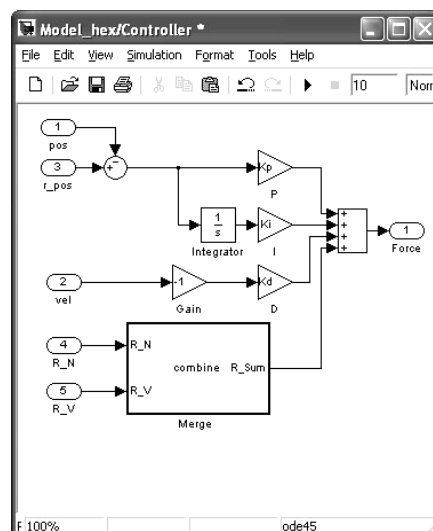


Рис. 3.9 Модуль розрахунку статичного навантаження в приводі лінійного переміщення штанги

Геометричні параметри траєкторії переміщення робочої платформи механізму визначаються на основі системи матричних рівнянь які описують геометричні перетворення внаслідок здійснення відповідних координатних переміщень ланок механізму (рис. 3.10).

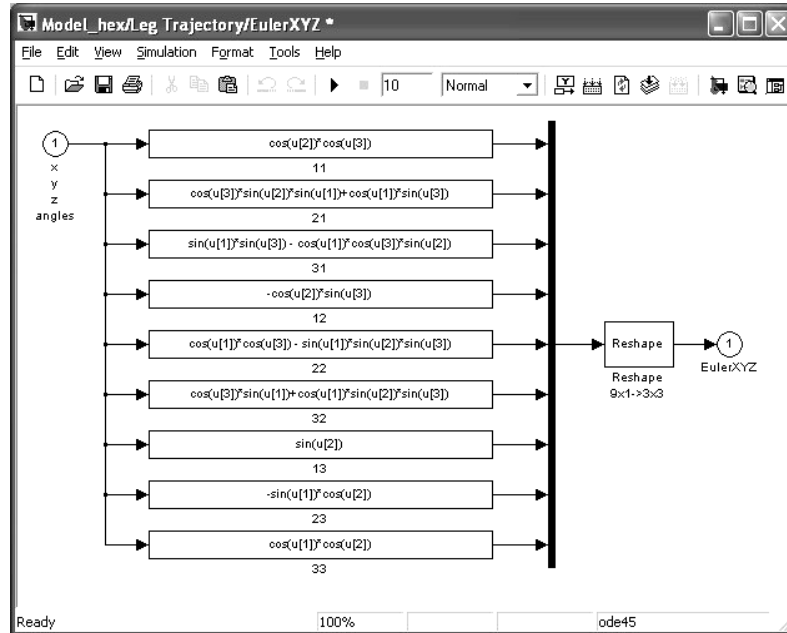


Рис. 3.10 Модуль визначення геометричних параметрів траєкторії переміщення робочої платформи механізму

Модель оснащена системою вихідних функцій які дозволяють отримати дійсні координати положення робочої платформи механізму та вихідні навантаження які діють в усіх шарнірних з'єднаннях елементів механізму.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

Розроблена модель використовувалась для здійснення машинного експерименту з дослідження форми траєкторії руху платформи, ваги об'єкту маніпулювання, розмірів зони маніпулювання та інше.

В першому експерименті переміщення задавалось у вигляді дуги кола радіусом 350 мм, центр кола зміщений відносно центра робочої зони на 100 мм, вага об'єкта маніпулювання 6 кГ, швидкість переміщення платформи 0.2 м/с, нахил площини в якому розташована дуга траєкторії переміщення 10°.

Результати отримані при виконанні експерименту представлені на рис. 4.1 та 4.2.

На рис 4.1 отримані залежності являють собою 1-поточні координати платформи, м; 2 – абсолютна похибка довжин штанг, м; 3 – зусилля у приводі лінійного переміщення штанги, Н.

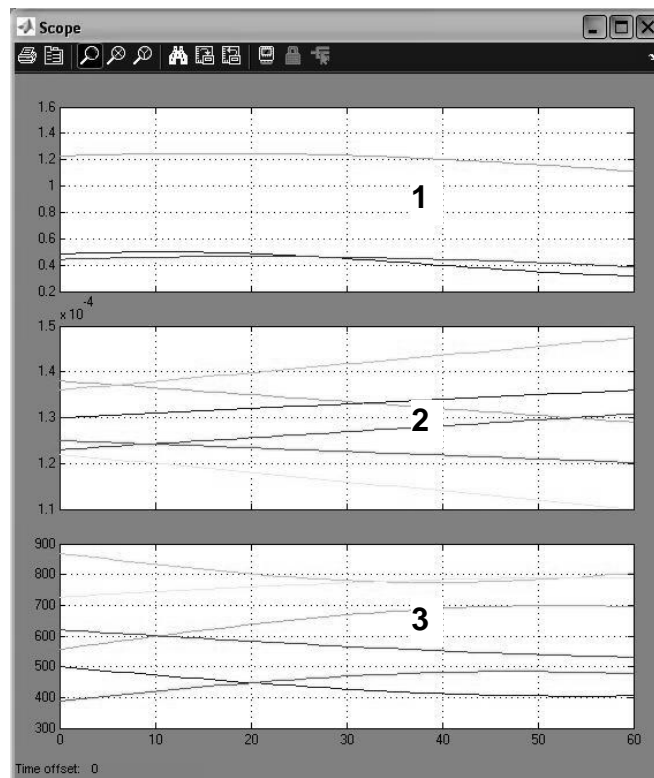


Рис. 4.1 Результати отримані при виконанні експерименту

На рис 4.2 представлені 1 – абсолютний кут розвороту і - ї штанги в верхній опорі, рад; 2 – абсолютний кут розвороту і - ї штанги в нижній опорі, рад; 3 – сила реакції і - ї штанги у нижній опорі, Н; 4 – сила реакції і - ї штанги у верхній опорі, Н;

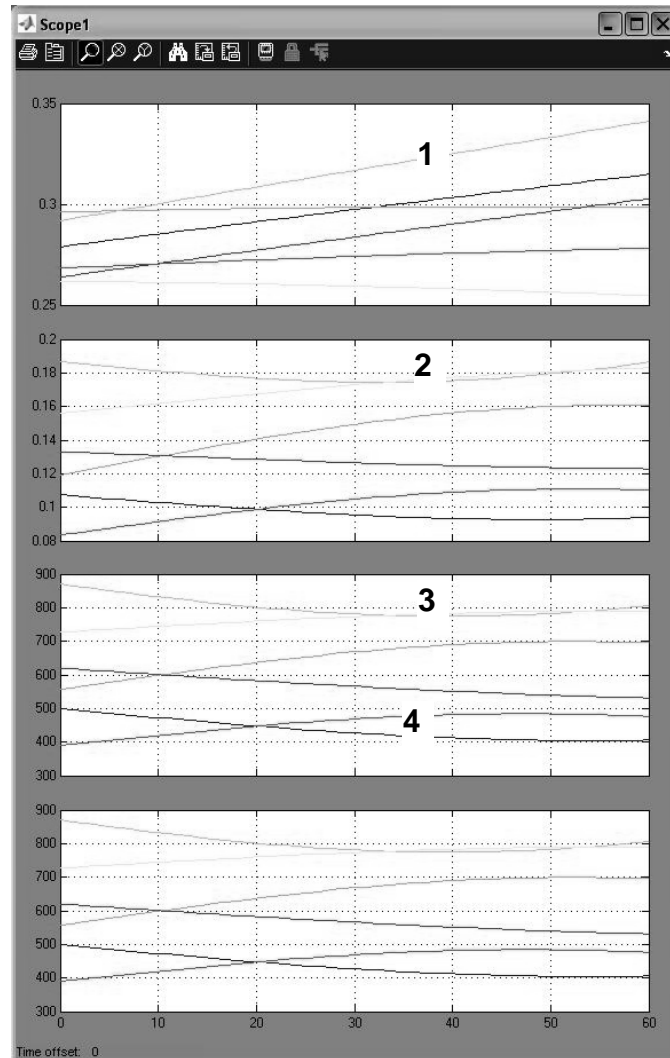


Рис 4.2 Результати отримані при виконанні експерименту

В другому експерименті переміщення задавалось у вигляді відрізка прямої лінії довжиною 250 мм, кут нахилу площини в якій розташована пряма траєкторії складає 15° площині XOZ та 10° в площині YOZ, вага об'єкта маніпулювання 6 кГ, швидкість переміщення платформи 0.3 м/с, 10° .

Результати отримані при виконанні експерименту представлені на рис. 4.3 та 4.4.

На рис 4.3 отримані залежності являють собою 1-поточні координати платформи, м; 2 – абсолютна похибка довжин штанг, м; 3 – зусилля у приводі лінійного переміщення штанги, Н.

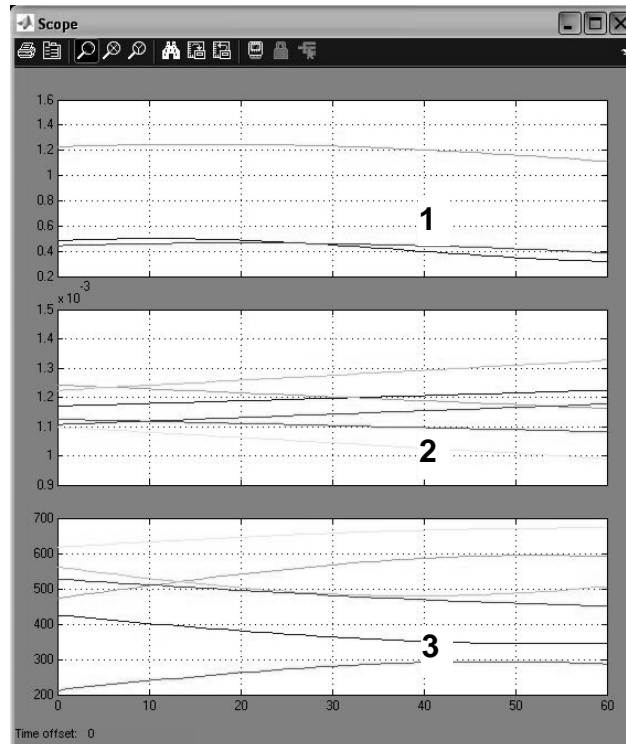


Рис 4.3 Результати отримані при виконанні експерименту

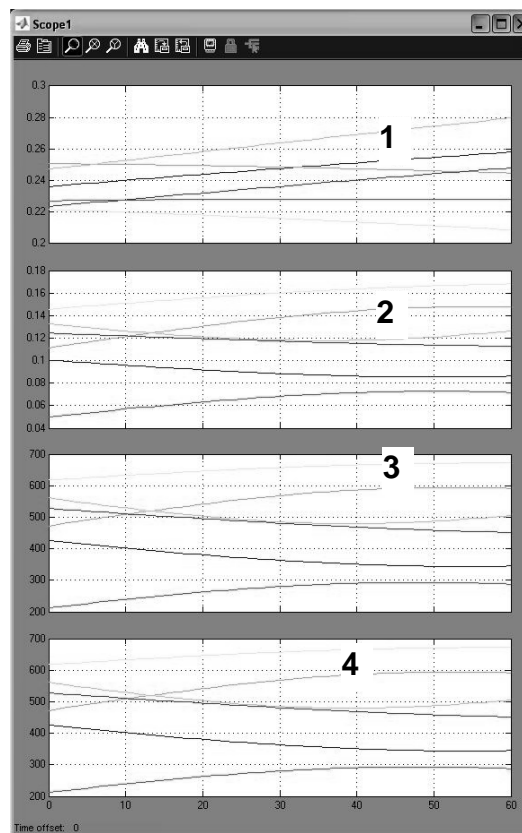


Рис 4.4 Результати отримані при виконанні експерименту

На рис 4.4 представлені 1 – абсолютний кут розвороту $i - \bar{i}$ штанги в верхній опорі, рад; 2 – абсолютний кут розвороту $i - \bar{i}$ штанги в нижній опорі, рад; 3 – сила реакції $i - \bar{i}$ штанги у нижній опорі, Н; 4 – сила реакції $i - \bar{i}$ штанги у верхній опорі, Н;

Висновки

1. Помилки положення веденої точки платформи від похибок довжин ланок можуть бути зменшені регулюваннями. Вектори помилок положення механізму від регулювань завжди паралельні відповідним регулюванням і не залежать від кута, утвореного суміжними сторонами паралелограма.

2. Регулювання Δx_1 і Δy_1 , які представляють собою зсуви веденої точки і точки опори платформи, уподовж відповідних ланок, зменшують вплив похибок ведучої і опорної ланки (Δq_1 і Δq_5) - В результаті на точність роботи платформи роблять вплив лише величини рівномірності паралельних плечей паралелограма ($\Delta q_{2,4}$ і $\Delta q_{3,5}$)

3. Регулювання Δx_{N_1} і Δy_{N_1} зсуву веденої і опорної точок механізму платформи по перпендикулярах до відповідних ланок служать для зменшення помилки положення від впливу рівномірності протилежних ланок паралелограма ($\Delta q_{2,4}$ і $\Delta q_{3,5}$). Одночасно з цими регулюваннями слід вводити додаткове регулювання Δx_2 . Це дозволяє зменшити відповідну помилку положення механізму від 3 до 8 разів залежно від діапазону кутів, утворених суміжними сторонами штанг лінійних переміщень.

4. При проектуванні платформи діапазон зміни кутів, утворених суміжними кутами, слід передбачати мінімальним, оскільки зменшення діапазону кутів на 20° допускає збільшення більш ніж в два рази допусків на величини рівномірності кутового положення платформи ($\Delta q_{2,4}$ і $\Delta q_{3,5}$), при одній і тій же заданій точності відтворення траєкторії переміщення платформи.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. www.neosrobotics.com
2. perso.wanadoo/cmw.meca.6x/6AXES.html
3. “Renault Automation Magazine”, № 21, травень 1999
4. www.toyoda-kouki.co.jp
5. www.neosrobotics.com
6. <http://www.fips.ru/ruptimage/>
7. Челноков Ю. Н. Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения. Геометрия и кинематика движения. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 512 с. - ISBN 5-9221-0680-5.
8. Белянин, П. Н. Промышленные роботы западноевропейских стран: обзор зарубежного опыта. - М. : НИАТ, 1976. - 171 с.
9. Переляев СЕ. Трехмерная параметризация группы вращений твердого тела в системах гироскопической ориентации / СЕ. Переляев // Изв. РАН. Механика твердого тела. — 2003. — № 3. — С. 19-31.
10. Иванов А.А. Основы робототехніки: навч. посібник / А. А. Іванов; НГТУ ім. Р.Є. Алексєєва. – Нижній Новгород, 2011. – 200 с. – ст. 42 – [1]
11. Белянин, П. Н. Промышленные роботы. - М. : Машиностроение, 1975. - 398 с.
12. Козырев, Ю. Г. Промышленные роботы. Справочник метал-листа, т.5. - М. : Машиностроение, 1978. - 673 с.
13. Вейц В.Л., Кочура А.Е., Мартыненко А.М. Динамические расчеты приводов машин – Л.: Машиностроение, 1971 – 352 с.
14. Вербa И.И. Методы и механизмы отрезки деталей резцами на токарных автоматах: Дис. ... канд.техн.наук: -Киев,1986.-272с.
15. Волосов С.С., Педь Е.И. Приборы для автоматического контроля в машиностроении.-М.:Машиностроение,1970.-310с.

16. Воробьева Т.С., Итин А.М., Комарова А.П. Исследование колебаний токарных многошпиндельных вертикальных полуавтоматов // Станки и инструмент – 1971 - №10 – с.19 – 21.
17. Вульфсон И.И., Коловский М.В. Нелинейные задачи динамики машин – Л.: Машиностроение, 1968 – 284 с.
18. Гришандлы В.Ф., Климовский В.В. Влияние главного привода на виброустойчивость фрезерных станков // Станки и инструмент – 1985 -№1 – с. 24-26.
19. Челноков Ю. Н. Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения. Геометрия и кинематика движения. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 512 с. - ISBN 5-9221-0680-5.
20. Переляев СЕ. Трехмерная параметризация группы вращений твердого тела в системах гироскопической ориентации / СЕ. Переляев // Изв. РАН. Механика твердого тела. — 2003. — № 3. — С. 19-31.
21. Малов, А. Н. Автоматические загрузочные устройства. Справочник металлиста. Т.5. - М. : Машиностроение, 1978. - 673 с.
22. Бобров, В. П. Автоматизация транспорта. Справочник металлиста. Т.5. - М. : Машиностроение, 1978. - 673 с.
23. А.с. № 549311 СССР. Захватное устройство / Ю. М. Буянов - Оpubл. в Б. И. 1977, № 9.
24. Бобров, В. П. Проектирование загрузочно-транспортных устройств к станкам и автоматическим линиям, - М. : Машиностроение, 1964. - 291 с.
25. FlexShapeGripper. Gripping modelled on a chameleon's tongue // Режим доступа: www.festo.com/bionic –
26. FlexShapeGripper. Gripping modelled on a chameleon's tongue // Режим доступа: www.festo.com/bionic
27. RG6 Gripper Datasheet // Режим доступа: www.festo.com/bionic
28. RG6 Gripper Datasheet // Режим доступа: www.festo.com/bionic
29. MultiChoiceGripper // Режим доступа: www.festo.com/bionic
30. MultiChoiceGripper // Режим доступа: www.festo.com/bionic

31. Бе́лянин, П. Н. Промышленные роботы западноевропейских стран: обзор зарубежного опыта. - М. : НИИТ, 1976. - 171 с.
32. Gripping Tool for Industrial Robot. Каталог фирмы ASEA (Швеция), 1975.